

Національний технічний університет України
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені Ігоря Сікорського»
МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ
Кафедра технології машинобудування
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

Юрій ПЕТРАКОВ

“ ____ ” _____ 2020р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-науковою програмою «Технології машинобудування»
зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»

на тему: Розробка динамічної моделі технологічної оброблювальної системи

Виконав: студент 6 курсу, групи МТ – 81мн
(шифр групи)

Сікайло Максим Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові) _____ (підпис)

Науковий керівник: к.т.н., доц. Кореньков В.М.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Консультант: стартап к.т.н., доц. Кореньков В.М.
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Механіко-машинобудівний інститут
Кафедра Технології машинобудування**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)
Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»
Освітньо-наукова програма «Технології машинобудування»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Завідувач кафедри

_____ **Юрій ПЕТРАКОВ**
(підпис) (ім'я, прізвище)

« ____ » _____ 2020р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Сікайло Максим Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: *Розробка динамічної моделі технологічної оброблювальної системи*

науковий керівник: к.т.н., доц. Кореньков В.М.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « 04 » березня 2020р. № 800-с

2. Термін подання студентом закінченої дисертації « 01 » травня 2020р.

3. Об'єкт дослідження: *технологічна оброблювана система*

4. Предмет дослідження: *процес фрезерування*

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: *розробити математичну модель процесу фрезерування, що відбувається у пружній ТОС; розробити метод, який дозволяє управляти процесом різання за поточною інформацією в режимі реального часу; розробити програмно-апаратний комплекс для вимірювання коливань та управління процесом різання*

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: *слайди Ms PowerPoint, додаткові мультимедіа матеріали*

7. Орієнтовний перелік публікацій: *2 публікації*

8. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

(ім'я, прізвище)

Науковий керівник

(підпис)

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Актуальність теми. Одним з найперспективніших шляхів підвищення якості обробки на верстатах з ЧПК є створення і використання інтелектуальних систем управління, які враховують технічні характеристики, стан верстата, ріжучого інструменту, заготовки та вимірювальної системи. Наразі досить актуальною є розробка теоретичних і експериментальних досліджень, що дозволяють побудувати формальну математичну модель, на основі якої стане можливою програмна корекція виконавчих рухів металорізального обладнання, а саме руху подачі, в режимі реального часу.

Мета і завдання. Підвищення якості оброблення деталей на фрезерних верстатах з ЧПК шляхом врахування динамічних характеристик технологічної системи.

Об'єкт дослідження – технологічна оброблювана система.

Предмет дослідження – процес фрезерування.

Наукова новизна. Розроблено математичну модель та встановлено функціональну залежність для розрахунку параметрів коливань технологічної системи при фрезеруванні.

Практичне значення. Розроблено програмне забезпечення для аналізу вібрацій технологічної оброблювальної системи.

Апробація результатів магістерської. Результати роботи представлялися на «XV Международной научно-практической конференции «Наука и образование без границ – 2019» строки проведения: 07-15.12.2019» та XVI Международной научно-практической конференции «Европейская наука XXI века – 2020» строки проведения: 07-15.05.2020.

Публікації. По темі роботи опубліковано статтю: Кореньков В., Чорний І. Сікайло М. «Визначення динамічних характеристик технологічної обробної системи» / Материалы XV Международной научно-практической конференции

«Наука и образование без границ – 2019» <http://s-konf.mmi.kpi.ua/imm2019/paper/view/13770/6761>; Кореньков В.М, Сікайло М.О. «Побудова математичної моделі технологічної обробної системи при фрезерування» / Материалы XVI Международной научно-практической конференции «Европейская наука XXI века – 2020» http://www.ukrnauka.ru/2020_ADEN/2020-05-15_A4

Структура та об'єм роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатків. Робота викладена на 89 сторінках машинописного тексту, містить 34 рисунки, та 34 найменувань використаних літературних джерел. Загальний об'єм роботи складає 89 сторінок.

ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано її мету та завдання, представлено нові наукові результати, наведено їх практичну значимість.

У **першому розділі** проведено аналіз існуючих методів побудови математичних моделей динамічних систем.

У **другому розділі** поставлено задачу та проведено теоретичне дослідження, яке завершено формуванням математичної моделі для вирішення поставленої задачі.

Третій розділ присвячено практичному дослідженню сформованої математичної моделі та втіленню її у програмному забезпеченні для подальшого впровадження на виробництві.

У **четвертому розділі** описаний стартап проект розроблення систем моніторингу та управління процесом різання на фрезерному верстаті з ЧПК.

SUMMARY

Actuality of theme. One of the most promising ways to improve the quality of processing on CNC machines is the creation and use of intelligent control systems that take into account the technical characteristics, condition of the machine, cutting tool, workpiece and measuring system. Currently, the development of theoretical and experimental studies that allow to build a formal mathematical model, based on which it will be possible to programmatically correct the executive movements of metal-cutting equipment, namely the movement of the feed, in real time.

Purpose and objectives. Improving the quality of machining parts on CNC milling machines by taking into account the dynamic characteristics of the technological system.

The object of research is a technological processed system.

The subject of research is the milling process.

Scientific novelty. A mathematical model has been developed and a functional dependence for calculating the parameters of oscillations of the technological system during milling has been established.

Practical meaning. Software for vibration analysis of technological processing system has been developed.

Approbation of master's results. The results were presented at the "XV International Scientific and Practical Conference" Science and Education without Borders - 2019 "line items: 07-15.12.2019" and the XVI International Scientific and Practical Conference "European Science of the XXI Century 2020" line items: 07-15.05 .2020.

Publications. On the topic of work published article: Korenkov V., Chorny I. Sikailo M. "Visualization of the dynamic characteristics of a technological testing system" / Materials of the XV International Scientific and Practical

Conference “Science and Education without Borders - 2019” <http://s-konf.mmi.kpi.ua/imm2019/paper/view/13770/6761>; Korenkov V.M., Sikailo M.O. “Pobudova mathematical model of technological testing system for milling” / Materials of the XVI International Scientific and Practical Conference “European Science of the XXI Century - 2020” http://www.ukrnauka.ru/2020_ADEN/2020-05-15_A4_tom-21.pdf

STRUCTURE AND SCOPE OF WORK

The dissertation consists of an introduction, four sections, conclusions, a list of used sources and appendices. The work is presented on 89 pages of typewritten text, contains 34 figures, and 34 titles of used literary sources.

The total volume of the work is 89 pages.

CONTENT OF THE WORK

The introduction substantiates the relevance of the work, formulates the purpose and objectives, presents new scientific results, presents their practical significance.

The first section analyzes the existing methods of constructing mathematical models of dynamical systems.

In the second section the problem is set and a theoretical research is carried out, which is completed by forming a mathematical model for solving the problem.

The third section is devoted to the practical study of the formed mathematical model and implementation in software for further implementation in production.

The fourth section describes the startup project for the development of systems for monitoring and controlling the cutting process on a CNC milling machine.

ЗМІСТ

ВСТУП	12
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ПРИКЛАДІВ ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ.....	14
1.1 Методи моделювання технічних систем	14
1.2 Математичні моделі процесу різання	15
1.3 Автоматизовані системи контролю вібрацій та управління режимами різання в реальному часі.....	28
1.3.1 Machining Navi – by Okuma.....	28
1.3.2 Система VCM (Монітор контролю вібрації) - від Omative	30
1.3.3 Система Promos 2 Prometec	31
1.3.4 Система Toolinspect II MCU	33
1.3.5 Приспособа Qass IM Optimizer 4D Toses	34
1.3.6 Система MZ84 Mozys	34
1.4 Висновки	37
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ..	38
2.1 Форми представлення математичних моделей	38
2.1.1 Адекватність та ефективність математичних моделей	38
2.1.2 Вимоги до математичних моделей.....	40
2.1.3 Лінеаризація математичних моделей.....	41
2.1.4 Три форми представлення математичних моделей	43
2.2 Автоматичне управління процесом різання за поточною інформацією ...	46
2.3 Обробка даних вимірювань.....	52
2.3.1 Визначення частот власних коливань системи.....	52
2.3.1.1 Ударне тестування	53
2.3.2 Інтерполяція даних	55
2.3.3 Фільтрація шумів	57

2.3.4 Перетворення Фур'є та обробка спектру коливань.....	58
2.3.5 Вимірювання жорсткості системи.....	58
2.3.6 Визначення декременту коливань.....	60
2.3.7 Розрахунок приведеної маси.....	61
2.4 Метод управління процесом різання.....	62
2.5 Висновки	65
РОЗДІЛ 3 АПАРАТНІ ЗАСОБИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КОЛИВАНЬ ТА УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ РІЗАННЯ	67
3.1 Акселерометр.....	67
3.2 Динамометр.....	69
3.3 Альтернативні апаратні засоби.....	73
3.4 Висновки.....	74
РОЗДІЛ 4 СТАРТАП.....	75
4.1 Опис ідеї проекту	76
4.1.1 Аналіз вимірювальних систем.....	77
4.1.2 Усунення вібрацій.....	77
4.1.3 Аналіз систем спостереження.....	79
4.2 Аудит проекту	79
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	80
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	84
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	85
4.6 Висновки	86
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	88

ВСТУП

Предметом багатьох досліджень є динамічний зв'язок, який формується в процесі різання і обробляючої динамічної підсистеми верстату зі сторони різального інструменту та заготовки. Динамічний зв'язок, який утворюється процесом різання, в основному визначає стійкість траєкторії формотворчих рухів інструменту відносно заготовки, а це має безпосередній вплив на траєкторії переміщення виконавчих елементів верстату. Один із способів математичного опису динамічного зв'язку, який виникає в процесі різання є математичне моделювання.

Вібростійкість процесу різання визначається динамічними характеристиками технологічної системи (далі – ТС) і процесом різання. Процес оброблення на верстаті супроводжується віброакустичними коливаннями динамічної системи. Вони визначаються змінними в часі силами різання, перемінними силами тертя, демпфіруванням та іншими факторами, що мають широкий спектр частот. Основним методом управління процесом різання є зміна параметрів режиму різання (подачі, глибини різання, частоти обертання). Вищевказані параметри впливають на інтенсивність віброакустичних коливань, що в свою чергу дозволяє підвищити точність оброблення.

Виходячи з вищевказаного є доцільним визначати вібростійкі зони, на основі яких підбирати режими різання які зможуть забезпечити потрібну точність оброблення. Також вони дозволять збільшити продуктивність оброблення, зменшити зношування інструменту.

Динамічні характеристики ТС можна оцінити за допомогою вимірювання вібраційних коливань (віброприскорення, вібростійкість, вібропереміщення), їх наступне опрацювання у вигляді зон стійкості, які будуть основою для формування критеріїв призначення режимів різання.

У сучасному машинобудуванні оптимальні параметри процесу різання підбираються на досить високому рівні, але існує небагато праць, які вивчали методи цілеспрямованого регулювання динамічних характеристик ТС безпосередньо під час протікання процесу різання.

При аналізі даних багатьох досліджень, можна зробити висновок, що саме похибки, які виникають у наслідок деформацій ТС, є основною складовою загальної похибки при обробленні. Змінні у часі деформації спричиняють особливу шкоду через те, що їх неможливо компенсувати звичайним розмірним врахуванням у технологічному ланцюзі.

Тому спираючись на вищевказані фактори важливим для сучасного машинобудування є завдання розробки концепції компенсуючих пристроїв, які дозволять у реальному часі під час протікання процесу різання керувати режимами різання таким чином, щоб максимально вигідно використовувати динамічні параметри ТС.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ПРИКЛАДІВ ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ

1.1 Методи моделювання технічних систем

При дослідженні або при моделюванні технічних систем, використовують різні методи моделювання.

Є два розділи математики – класична і прикладна. Вони залежать від характеру математичного апарату який використовується.

Такі методи математики, які включають в собі математичний аналіз і теорію ймовірності, не завжди в наукових дослідженнях є основними. І використовуються для розв'язання проектних задач під час осміслення і створення технічних систем.

Інженерами які на практиці працюють з методами прикладної математики знають, що їх номенклатура значно ширша і частіше використовується. Ті методи, які до неї входять нестандартні за вмістом простих розрахунків, методом їх реалізації, прийомами які використовуються тощо.

Найчастіше правильний вибір методу математичного моделювання багато в чому залежить від ступеня деталізації системи, закону буття елементів об'єкта і зовнішніх дії. Можна виокремити три основні рівня моделювання:

1) моделювання систем за структурою і використання моделей і використанням спеціальних мов моделювання, теорії множин, графів, граматик, алгоритмів, моделювання статистики;

2) моделювання функціональних систем логічно, їх моделі зображують у вигляді логічних рівнянь і будують використовуючи двох чи багатозначну логіку математики;

3) кількісне моделювання (аналіз) принципів схем елементів складальних систем. Їх моделі показують у вигляді системи не лінійних рівнянь (алгебраїчних або інтегродиференціальних) і вивчають, використовуючи метод функціонального аналізу, або теорії диф. рівнянь.

Група моделей об'єкту на структурному, логічному й кількісному рівнях моделювання представляє собою систему ієрархії, яка показує взаємозв'язок різних аспектів опису об'єкту.

1.2 Математичні моделі процесу різання

Через зміну сили різання в ТС виникають незатухаючі автоколивання, які мають великий вплив на сталість процесу різання. Автоколивання утворюються за рахунок енергії яка виникає через роботу ТС та розподіляється по ній. Побудова математичної моделі дозволяє чинити вплив на хід обробки залежачи від зміни показників вібростійкості, це дає можливість забезпечити сталість процесу різання, отже забезпечити задану якість поверхні та точність величини зрізаного шару .

В праці Ю.В. Петракова, М.А.Данильченко, А.И.Петришин [1] розроблено технологію прогнозування вібрацій при точінні, яка заснована на моделюванні процесу різання в часі і в частотному діапазоні з використанням діаграми Найквіста. Процес різання виконується в пружній технологічній оброблюваній системі і по своїй природі є замкнутою. Крім того, процес різання, як правило є багатопрохідним, це характеризується обробленням «по сліду». Виникнення регенеративних автоколивань суттєво впливає на ефективність процесу, падає якість поверхні оброблюваної деталі і точність розмірів. Авторами створена математична модель процесу точіння, яка складається з окремих моделей сили різання, пружної замкнутої динамічної системи і геометричної взаємодії. Структурна схема процесу точіння представлена на (рис.1.1).

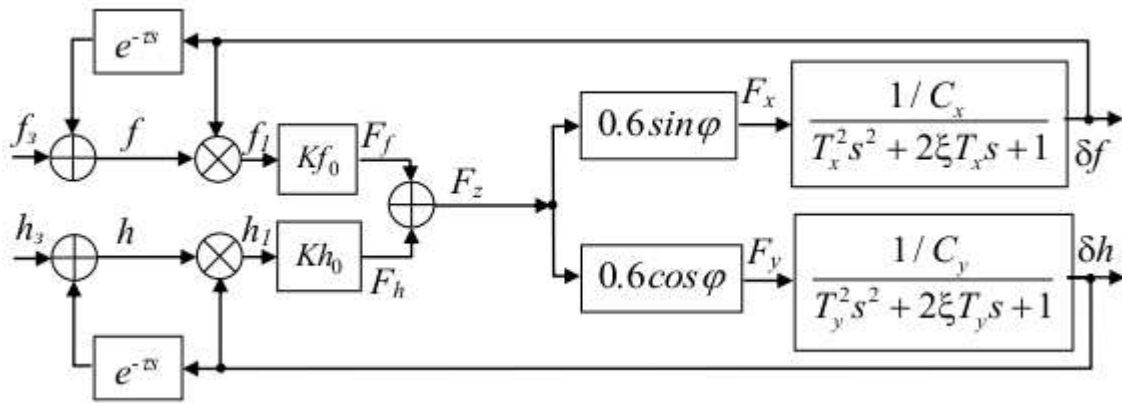


Рисунок 1.1 – Структурна схема процесу точіння

Пружна динамічна система представлена одномасовою моделлю, яка знаходиться під дією силового збудження по двом координатам відповідними складовими сили різання. Жорсткість по координатним осям визначаються експериментально, а частота власних коливань – по головній гармоніці спектра реакції системи на імпульсне навантаження, тобто по її ваговій характеристиці. Автор моделює систему численними методами в часовому і частотному діапазоні і представляє математичну модель у вигляді передаточної функції з зображенням по Лапласу. Були проведені експериментальні дослідження, які підтвердили адекватність розробленої математичної моделі.

Жорсткість вимірювалася за допомогою тензометричного динамометра, а переміщення за допомогою індикатора. Вагову характеристику вимірювали за допомогою акселерометра. Це являється реакцією системи на імпульсну дію в результаті удару молотком.

Для моделювання процесу різання була створена прикладна програма, яка базується на розробленій математичній моделі.

Лисенко О.В [2] запропонував двухмасову динамічну модель технологічної оброблюючої системи точіння для визначення ефектів динамічного гасіння коливань, і трьохмасову – для визначення геометричної точності формоутворення і поперечному розрізі деталі (рис.1.2).

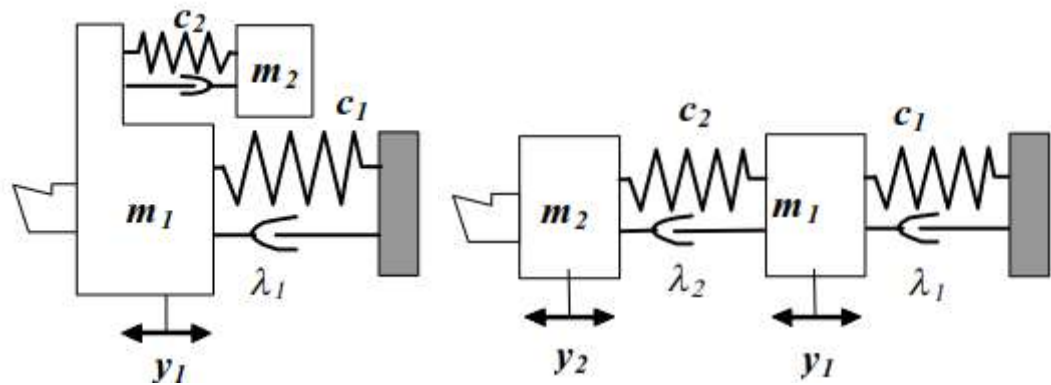


Рисунок 1.2 – Динамічні моделі динамічних гасників коливань

В праці С.А.Воронов [3] розглядає математичну модель, яка дозволяє чисельно вивчити процес фрезерування нежорстких деталей циліндричною фрезою. Основною причиною, яка знижує якість обробленої поверхні являються коливання, які виникають в системі «інструмент-деталь». Поряд з вимушеними коливаннями системи, зумовленими перемінною в часі силою різання, в ТС виникають автоколивання. Причина їх появи пояснюється наявністю регенеративного ефекту (різання за слідом). Коливання можуть призвести не тільки до зниження якості обробленої поверхні, але і до ушкодження інструменту. Систему диференціальних рівнянь, яка описує систему «інструмент-деталь», було представлено в наступному вигляді:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{F_x(\varphi)}{m_x} - \frac{k_x}{m_x} \dot{x} - \frac{c_x}{m_x} \cdot x, \\ \ddot{y} = \frac{F_y(\varphi)}{m_y} - \frac{k_y}{m_y} \cdot \dot{y} - \frac{c_y}{m_y} \cdot y. \end{cases}$$

В роботі розроблені додаткові критерії стійкості процесу фрезерування, який базується на аналізі якості обробленої поверхні. Автор в своїй роботі пропонує ввести два критерії стійкості: основного, який оцінює амплітуди вібрації фрези, і додаткового – він оцінює якість оброблюваної поверхні. За основний критерій стійкості приймається величина амплітуди відносних коливань фрези і оброблюваної поверхні. [3] Автор формулює основний критерій стійкості наступним чином: амплітуда відносних коливань центра

тяжіння фрези і оброблюваної деталі в напрямку кінцевої поверхні на деякій базовій довжині не повинна перевищувати величину, яка чисельна рівна 25% від величини подачі інструмента. По отриманим на базовій довжині амплітудам коливань будується відображення Пуанкаре (рис.1.3).

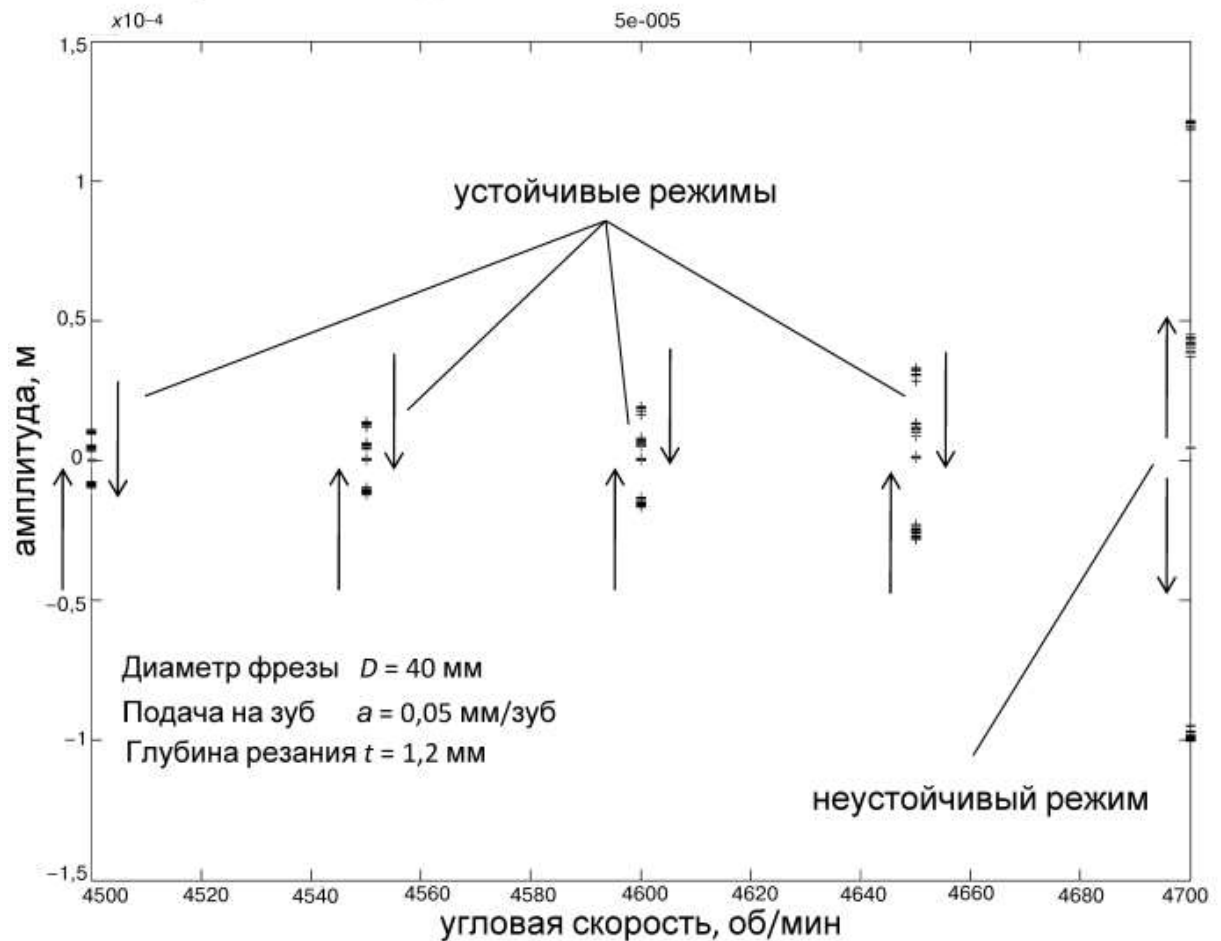


Рисунок 1.3 – Відображення Пуанкаре для амплітуди коливань в напрямку кінцевої поверхні.

У роботі В.А. Логоминова [4] подана математична модель кінцевого фрезерування нежорсткої деталі (рис.1.4).

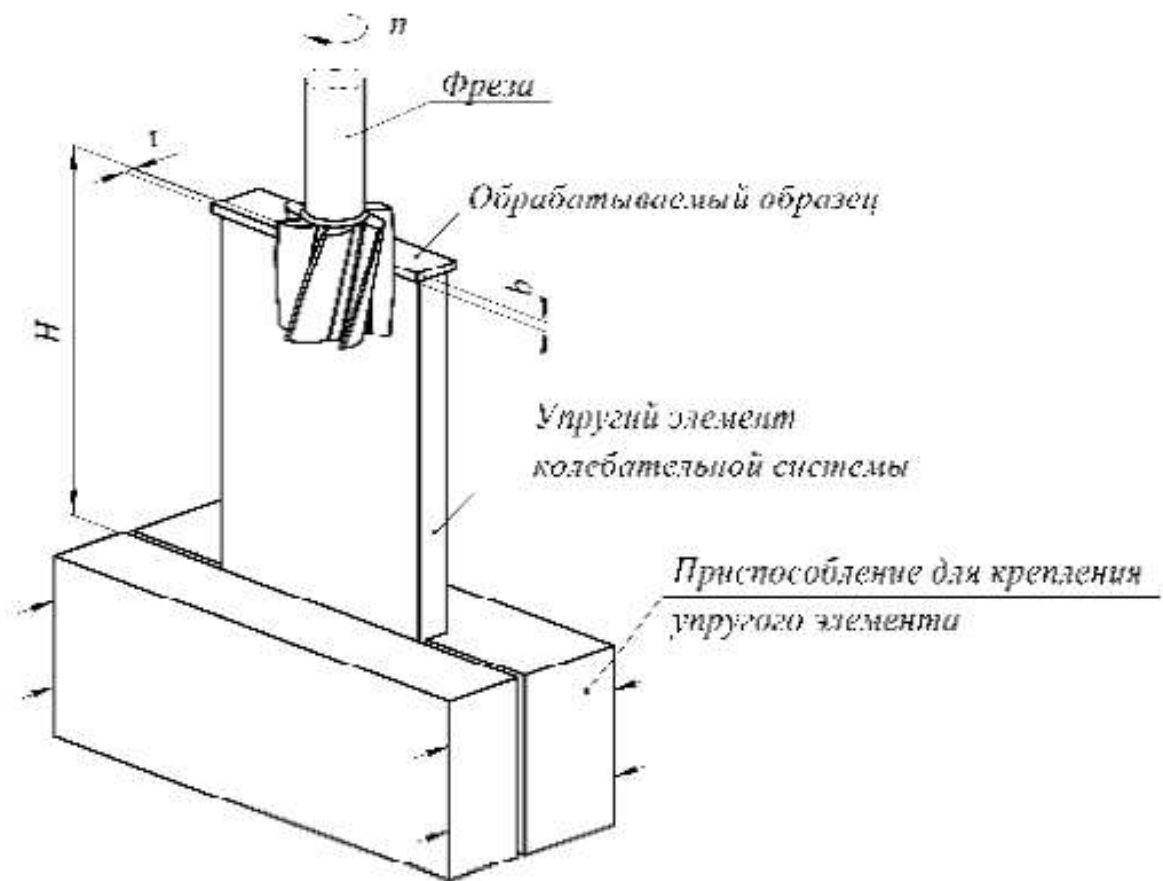


Рисунок 1.4 – Схема оброблення нежорсткої деталі

Деталь замінюють системою коливальною. Модель може складатися з геометричних моделей яка описує рех фрези, різні поверхні деталей, а також рухи. Саме головне, що вона дозволяє визначити глибину шару що зрізується в моменти часу. [4].

В роботі С.А. Зелинского [5] було створено математичну модель процесу контурного фрезерування нежорстких деталей. Розглянуто загальний випадок контурного фрезерування, при якому домінуючою в плані виникнення коливань можуть бути три складові ТС: жорсткість деталі j_d , жорсткість кінцевої фрези $j_{фр}$, жорсткість верстату $j_{ст}$ (рис.1.5).

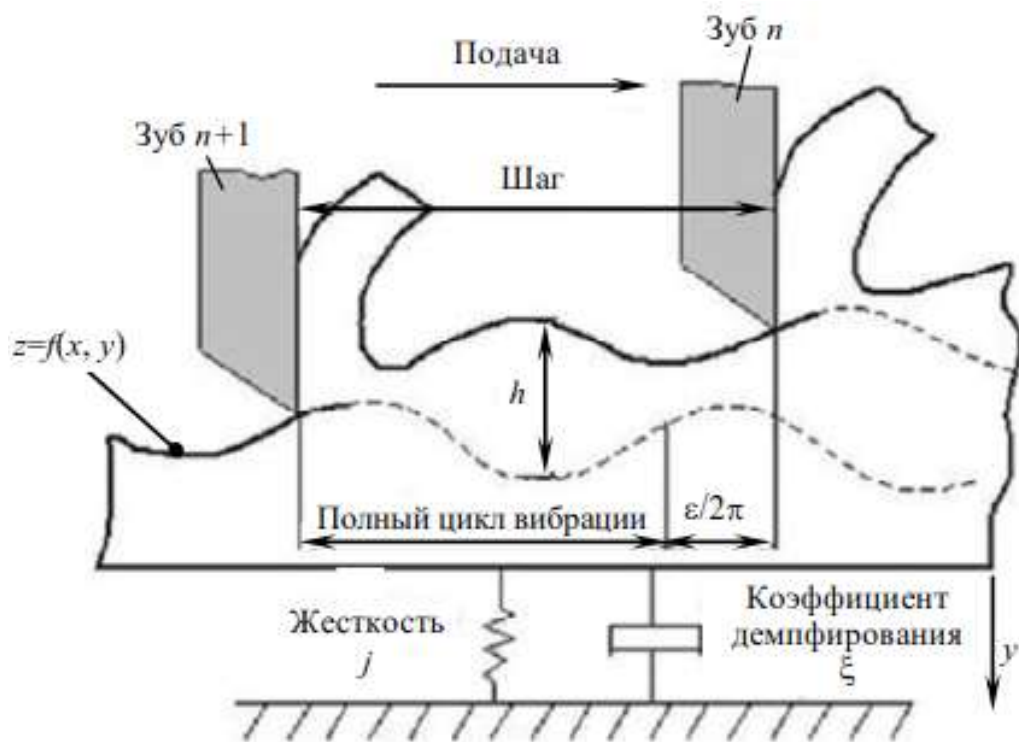


Рисунок 1.5 – Схема формування нерівностей при домінуючій підсистемі деталі.

В залежності від конкретних умов процесу фрезерування, таких як конфігурація і жорсткість оброблюваної деталі, діаметра і вильоту фрези і т.д, домінуючою складовою може бути будь яка з них або їх поєднання. В першому випадку домінуючою підсистемою являється підсистема деталі $j_d \ll j_{ст}, j_{фр}$. В другому випадку розглядається ситуація, при якій домінуючою підсистемою із умов збудження коливань є підсистема інструмента (кінцевою фрези) $j_{фр} \ll j_{ст}, j_d$. Другий випадок характерний для оброблення кінцевою фрезою малого діаметра і великого вильоту жорстких елементів деталі. Третій випадок, при якому домінуючими підсистемами є одночасно підсистеми деталі і інструменту. Даний випадок характерний при обробленні нежорстких деталей кінцевою фрезою малого діаметра і великого вильоту. Модель побудована з врахуванням упругодемпфуючих зв'язків всіх елементів ТС. Авторами були запропоновані диференціальні рівняння, за допомогою яких описуються коливальні процеси, які супроводжують обробку м'яких деталей кінцевими фрезами [5].

А в роботі А.Я. Красильников, К.Ю. Кравченко [6] представлена математична модель кінцевого фрезерування на основі моделі з одним ступенем свободи (рис.1.6).

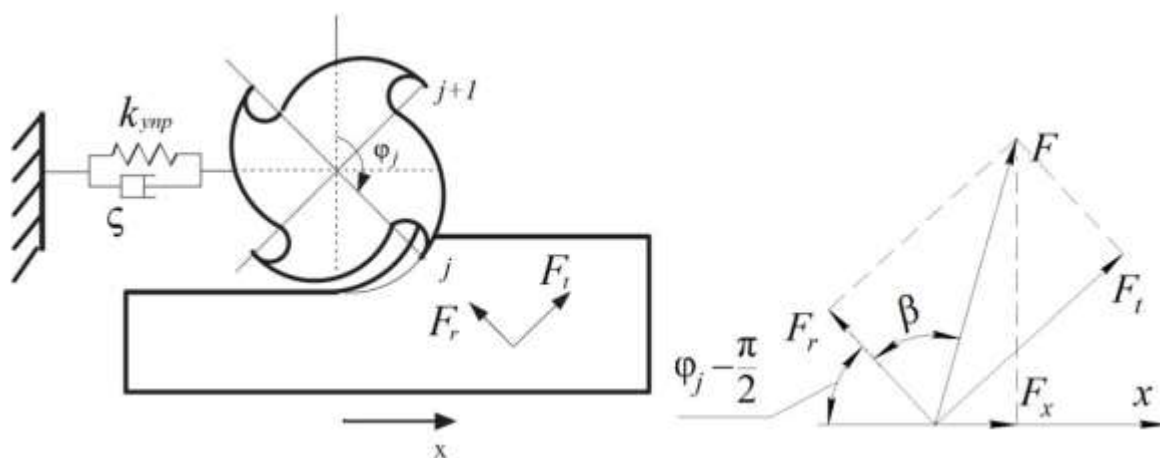


Рисунок 1.6 – Схема фрезерування з одним ступенем свободи.

Для представлення моделі отримано скалярне диференційне рівняння з постійним запізненням в уніфікованій формі. Для отримання рівняння автором сформульована теорема про асимптотичну стійкість. На основі рівняння і теореми побудовані графіки, які відображають положення границі стійкості.

Заварзин Д.А. Кисилёв И.А. Цыганов Д.Л [7] ставить цілю роботи визначення ефективних режимів оброблення деталей фрезою на 3х осьовому верстаті, при якому не виникають небажані регенеративні автоколивання, які приводять до суттєвого погіршення якості поверхні. Автор описує виникаючі в процесі фрезерування вібрації та їх вплив на форму оброблюваної поверхні і робочий інструмент. Складена математична модель процесу фрезерування, а також кінцево-елементна модель верстату для реалізації розрахунку в програмному забезпеченні. Також автором були знайдені власні частоти і форми для використання кінцево-елементної моделі [7].

Праця Чекишева Е.В., Гаспаряна Г.Д [8] присвячується відображенню діаграми стійкості процесу різання з додаванням коливань – ультразвукового

процесу різання (УЗПР) і порівнянню її з діаграмою механічного процесу різання (МПР). Для визначення динамічної сили різання розроблена математична модель, яка враховує властивості матеріалу, геометрію інструменту, умови різання і параметри коливань.

Р.В. Гусейнов [9] зіткнувся з проблемою низької оброблюваності корозійно-стійких сталей. В якості можливого способу покращення оброблюваності сталей і сплавів при різанні пропонується математична модель процесу різання яка використовується з методами планування багатофакторних експериментів. Розроблена адекватна поліноміальна математична модель впливу параметрів різання на сили різання, теоретичний аналіз якої дозволив намітити основні шляхи підвищення оброблюваності корозійно-стійких сталей.

В публікаціях Каірова О.С [10], Капустина Н.М [11], Сикора Е.А [12]. С.Н. Корчака [13]., що присвячені даній проблемі, були побудовані оптимізаційні математичні моделі. Але вони не враховували всі необхідні обмеження, бо були побудовані в основному на основі спрощених функціональних залежностей. В результаті вони не можуть відповідати умовам точності і адекватності. Тому є необхідність уточнення отриманих математичних моделей процесу різання.

В сучасному машинобудуванні одним із найважливіших завдань є визначення оптимальних режимів різання. Правильно вибрані режими різання дозволяють збільшити продуктивність і точність обробки, зменшити собівартість і розхід інструменту. Значення даної задачі збільшується в зв'язку з широким використанням верстатів з числовим програмним забезпеченням, автоматичних верстатних ліній, нових конструкційних матеріалів, а також сучасними САПР-ТП. Тому вивчення даного питання було продовжено в роботі [14] Авторами була розроблена уточнена оптимізаційна математична модель, яка описує процес різання конструкційних матеріалів при точінні, і на основі приведеної математичної

моделі розроблено програмне забезпечення підсистеми САПР розрахунку оптимальних режимів різання для токарної операції. Початковими даними слугують характеристики деталі, ріжучого інструменту, обладнання і оброблюваного матеріалу, які знаходяться в технологічних базах даних [14].

Характерними ознаками сучасного виробництва являються покращення експлуатаційних і техніко-економічних характеристик металорізальних верстатів, а також розширення номенклатури випускаємої продукції. Збільшення складності обладнання, як правило, спонукає за собою зниження його жорсткості, а разом з тенденцією постійного росту частот обертання шпинделів до 40 тис. об/хв і більше висуває на перший план і робить актуальною задачу забезпечення вібростійкості реалізованих на них процесів.

Автори роботи [15] в статі представляють математичну модель багатоцільового верстату, яка встановлює взаємозв'язок режимів оброблення і параметрів технологічної системи, яка визначає умови виникнення складових автоколивань, які викликані дисбалансом і порушують стабільність забезпечення технологічних показників процесу різання.

Таким чином, підвищення ефективності використання багатоцільових верстатів пов'язано в значній степені з раціональним вибором режимів різання, виключаючи можливість виникнення вібрацій, які обумовлені дисбалансом. При цьому створюються умови для забезпечення заданих вимог якості і точності оброблення. Для теоретичного обґрунтування такого вибору необхідно розробити математичний опис динамічної системи «шпиндельний вузол-оправка-інструмент», які враховують еволюціонуючий в процесі експлуатації характер автоколивань, визваних дисбалансом.

В праці К.Г.Потапова [16] описана можливість оцінки зносу ріжучої кромки токарного різця за допомогою фазохронометричного методу діагностики циклічних машин і механізмів. Авторами приводиться математична модель системи «шпиндель-різець-деталь» (рис.1.7), на базі якої

був проведений обчислювальний експеримент і зроблені відповідні висновки про можливості методу.

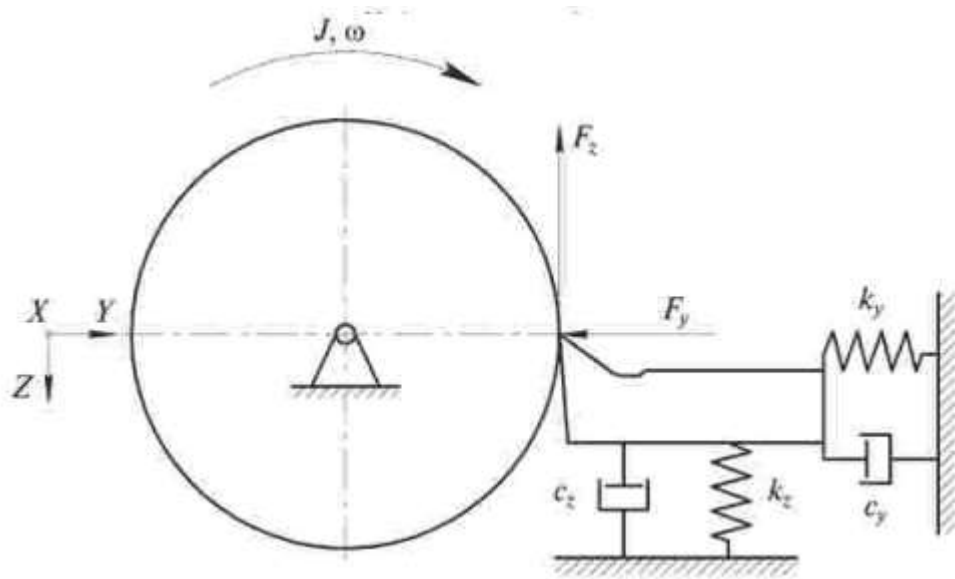


Рисунок 1.7 – Динамічна модель системи різець – деталь.

В рамках моделі розглядається стаціонарний режим оброблення, для якого було виведено аналітичний вираз, який зв'язує вимірювальний параметр (інтервал часу) з зносом ріжучої кромки.

В праці [17] при обробленні нежорстких валів система станок-деталь-інструмент виявляється дуже піддатливою до дії зовнішніх поперечних сил, що суттєво затрудняє їх оброблення. Виникаючі труднощі полягають головним чином в тому, що навіть при невеликих силах різання пружна система легко деформується, і при цьому з'являються великі похибки оброблення. Автори в статті представляють матеріали для розроблення математичної моделі процесу різання для створення нової технології оброблення нежорстких валів на токарному обладнанні.

Автор [18] дисертації ставить за ціль підвищити якість токарного оброблення за рахунок стабілізації сили різання і зниженню рівня коливань в технологічній системі. Для досягнення даної цілі автор вирішує ряд проблем, такі як: розроблення математичної моделі динаміки процесу точіння з врахуванням коливань підсистеми «інструмент-заготовка»; знаходження

чисельного вирішення моделі і розроблення програмного забезпечення; оцінка вібрацій і стійкості процесу точіння для технологічних систем з заданими параметрами; розробка, виготовлення, відладка і експериментальне дослідження статичних і динамічних характеристик адаптивного пристрою, стабілізуючого сили різання; проведення технологічних випробувань і визначення раціональних сфер застосування адаптивного пристрою.

Робота включає в себе комплекс теоретичних досліджень і моделювання на ЕОМ. При математичному описі коливальних процесів використовувались основні положення теорії пружності. Для наукового обґрунтування результатів автор використовує елементи теорії різання і теорії адаптивних технологічних систем. Для отримання вирішення сукупності диференціальних рівнянь автором був застосований чисельний метод сіток.

Автором був створений адаптивний пристрій для стабілізації сили різання. Суть пристрою складає в тому, що на різець діють в одному напрямку сила стиску пружини і сила притягування якоря електромагніту. При чому їх характеристика підібрана таким чином, що при збільшенні сили стиску пружин на ту саму величину зменшується сила притягування якоря, а сумарна сила дії пружини і електромагніту на каретку з різцем залишається постійною. При визначенні технологічних можливостей пристрою стабілізації сили різання автором проводились експерименти.

В праці [19] автор вказує, що основними джерелами виникнення автоколивань при точінні є координатний зв'язок і падаюча нелінійна залежність сили від швидкості різання. Координатний зв'язок проявляється в тому, що в загальному випадку під дією прикладеної сили вершина різця намагається зміститись не тільки в напрямлені вектору сили, но і в ортогональному напрямку. Автор вказує, що існують головні осі жорсткості, які зазвичай не співпадають з координатними осями верстату.

$$\begin{cases} m_1 \ddot{V}_1 + G_1 \dot{V}_1 + C_1 V_1 = Py(V_\phi; t_\phi) \cdot \cos \beta - Pz(V_\phi; t_\phi) \cdot \sin \beta = P_1(V_\phi; t_\phi); \\ m_2 \ddot{V}_2 + G_2 \dot{V}_2 + C_2 V_2 = -Py(V_\phi; t_\phi) \cdot \sin \beta - Pz(V_\phi; t_\phi) \cdot \cos \beta = P_2(V_\phi; t_\phi) \end{cases}$$

Для розрахунку автоколивань необхідно чисельними методами вирішувати диференційні рівняння. Даний метод займає багато часу. Тому авторами розроблений алгоритм отримання першої гармоніки сталих коливань, який дозволяє виключити із розрахунків перехідний процес і значно скоротити час рішення. В основі цього алгоритму лежить метод гармонічної лінеаризації (МГЛ).

В праці [20] автори продовжили розвиток своєї теми. На (рис.1.8) показана структурна схема нелінійної системи з врахуванням координатного зв'язку.

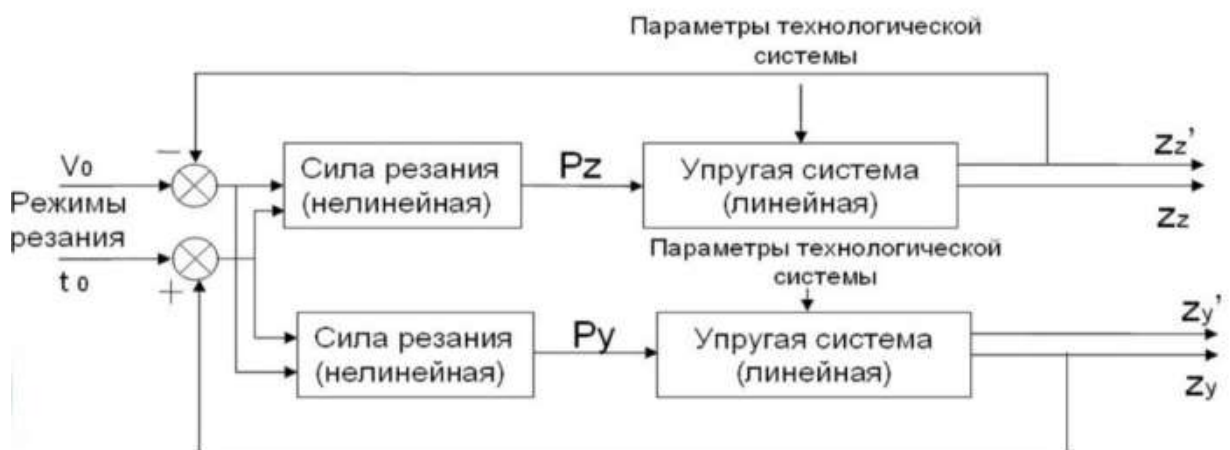


Рисунок 1.8 – Структурна схема нелінійної системи з врахуванням координатного зв'язку.

Також були проведені експерименти, в ході яких за допомогою розробленого програмного забезпечення були запропоновані оптимальні режими різання для точіння валу з марки 40Х. Математична модель автоколивань, доповнена методом гармонічної лінеаризації дає можливість управляти вібраціями і дозволяє на етапі проектування технологічних процесів прогнозувати хвилястість обробленої поверхні при точінні.

Також займався створенням математичної моделі при розточуванні Хорошайло В.В [21]. Головна відмінність полягає в тому, що автор розглядає динамічну модель пружної системи, яка представлена у вигляді двох пружин, які орієнтовані під деяким кутом до координатної системи (рис.1.9).

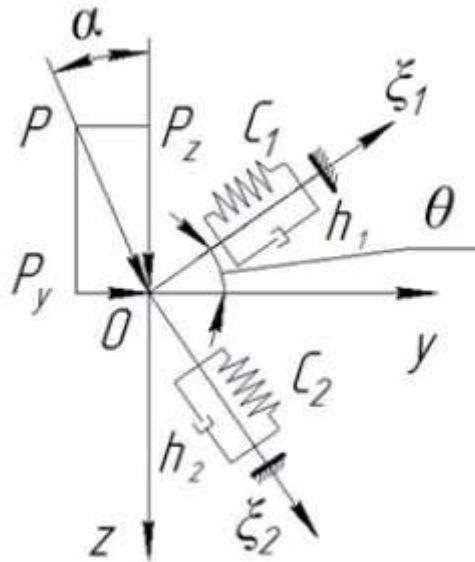


Рисунок 1.9 – Схема дії сил різання на пружну систему в площині YZ

Така модель може не тільки визначати пружне переміщення вершини різця в радіальному і тангенціальному напрямках під дією сили різання, але й дозволяє визначити відновлюючі сили, тобто сили пружності які виникають при відхиленні вершини різця від положення статичної рівноваги з врахуванням демпфування.

В праці [22] розроблена динамічна і математична модель процесу розточування, яка враховує конструкцію розточної оправки і нелінійної характеристики сили різання, а також запізнення які виникають через вплив слідів оброблення і фазових характеристик сили різання. Автор реалізував дану математичну модель в системі моделювання Matlab. Вона дозволяє прогнозувати амплітуди автоколивань при розточуванні.

В статі [23] розглядаються питання математичного моделювання і аналізу динамічних властивостей підсистеми ріжучого інструменту для

процесу точіння. Відмінність полягає в тому, що автори розглядають систему, яка має кінцеву жорсткість саме в осьовому напрямку. В роботі приділено особливу увагу аналізу стійкості підсистеми ріжучого інструменту в осьовому напрямку в залежності від варіювання двох параметрів – часу запізнення осьової складової сили різання від пружного зміщення різця і жорсткості процесу різання. Показано, що в залежності від значень пари параметрів – часу затримки осьової складової сили різання від пружного переміщення різця в осьовому напрямку X і жорсткості процесу різання, технологічна система може втратити стійкість, тобто перестати виконувати свої функції.

1.3 Автоматизовані системи контролю вібрацій та управління режимами різання в реальному часі

Через динамічні коливання під час процесу різання, можливе погіршення якості і точності оброблюваної поверхні. Тому був проведений аналіз сучасного машинобудівного ринку.

1.3.1 Machining Navi – by Okuma

Надмірні вібрації можуть негативно позначитися на якості деталі. Система Machining Navi вибирає оптимальну швидкість для запобігання вібрацій. Таким чином, оператор економить час і збільшує продуктивність. Система використовує систему управління типу OSP і датчики для контролю над вібраціями. При необхідності прикладне програмне забезпечення рекомендує коригування числа обертів шпинделя або виконує її автоматично.

Machining Navi L-g

Для токарних робіт на низьких швидкостях: Machining Navi L-g автоматично регулює число обертів шпинделя, знижує вібрації і забезпечує надійні швидкості обробки.

Machining Navi M-g

Для робіт на високих швидкостях: Machining Navi M-g аналізує вібрації за допомогою мікрофона і рекомендує оптимальні настройки і обороти шпинделя для виконання роботи без вібрацій.

Machining Navi M-i

Для високопродуктивного різання: Machining Navi M-i реєструє вібрації за допомогою вбудованих датчиків і знижує їх за рахунок коригування числа обертів. Таким чином, прикладне програмне забезпечення забезпечує оптимальний процес різання при максимальній продуктивності верстата. Крім того, за допомогою Machining Navi M-i можуть тестуватися нові матеріали і інструменти.

Machining Navi T-g

Для токарних верстатів: Machining Navi T-g виконує покрокове зниження вібрацій під час нарізки різьби шляхом коригування числа обертів шпинделя для кожної доріжки.

На дисплеї монітора компютера представляють результати вимірювання. Вони у вигляді графіка. Виробник запевняє, що отримані перетворені швидкості не великі. При чистовій обробці спостерігають кращий ефект.

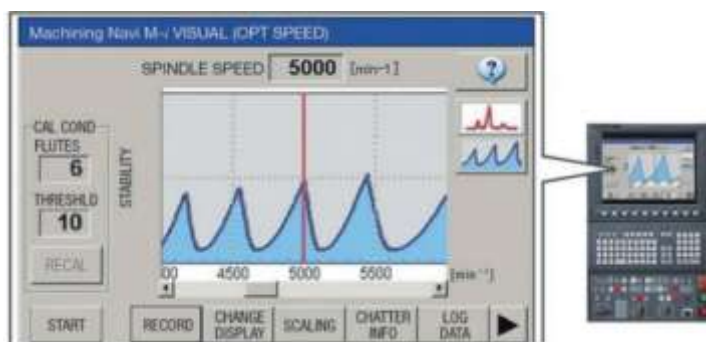


Рисунок 1.10 - Приклад вимірювання вібрації шпинделя від Okuma

1.3.2 Система VCM (Монітор контролю вібрації) - від Omative

Знос інструменту, поломка інструменту, знос і несправність підшипників шпинделя машини, погана обробка поверхні, низька якість виробу та навіть більш високе споживання енергії - все це є наслідком надмірних вібрацій. Монітор контролю вібрацій OMATIVE (VCM) контролює вібрацію 24x7x365, забезпечуючи уникнення таких умов, настільки руйнівних для продуктивності.

Система вимірює вібрації, які передаються компонентами верстату. Вимірювання відбувається за допомогою датчиків, потім сигнал передається на панель отримання і панель оператора для конфігурації системи і подання результатів обчислень на екран.

Система VCM - це двостороннє рішення, яке використовується для контролю стану верстатів та шпинделів, а також використовується для контролю за процесом обробки. В обох випадках система завжди працює і надсилає сповіщення у випадках надмірної вібрації, а машина зупиняється, коли вібрація стає сильною.

Усі верстати можуть бути оснащені VCM у плавному та швидкому процесі встановлення. VCM складається з блоку збору даних, датчика вібрації та програмного забезпечення на базі Windows, інтегрованого в НМІ ЧПУ. Кожен блок може підтримувати до трьох каналів.



Рисунок 1.11 – Система спостереження VCM від Omatic

1.3.3 Система Promos 2 Prometec

Система моніторингу модульних процесів забезпечує швидке виявлення зіткнень і надійний моніторинг інструменту для всіх механічних процесів:

- Виявлення поломки інструменту
- Виявлення неробочих етапів
- Виявлення місць контакту інструментів
- Виявлення зносу інструментів

Якщо система управління обладнана цифровим приводом, наприклад, SIMODRIVE 611 digital, функціональність центрів механічної обробки, агрегатних верстатів з делительно-поворотним столом і автоматичних ліній може досягатися без наявності спеціальних датчиків.

Крім того, передбачені додаткові функції для візуалізації, діагностики та оптимізації операцій верстата. Для користувача це означає:

- уникнути більшості поломок інструментів завдяки швидкої автоматичної заміни інструментів
- мінімізація пошкодження інструментів або деталей, запобігання подальших ушкоджень

- збільшення продуктивності без нарощування кількості персоналу
- збільшення якості за допомогою оптимізації процесів

Крім захисту верстата і інструментів, PROMOS 2 скорочує час і підвищує якість обробки деталей.

Введення даних оператором здійснюється централізовано за допомогою панелі оператора.

Модульна система PROMOS 2 випускається з різною продуктивністю (наприклад, з різними функціями моніторингу, різним числом інструментів, що підлягають моніторингу, приладом реєстрації даних про несправності), що забезпечує оптимальне відповідність завданням верстата з точки зору вартості і функціональності. PROMOS 2 може працювати з усіма датчиками PROMETEC (сили, розширення, відстані, активної потужності, обертового моменту, вібрації, вібраційного шуму, виробленого шуму).

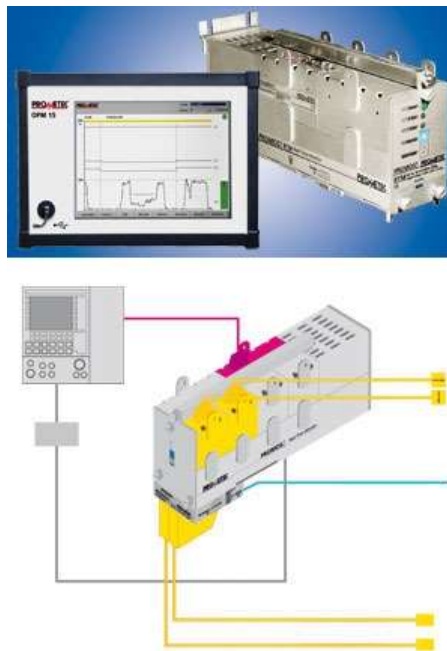


Рисунок 1.12 - Система спостереження Promos 2 від Prometec

1.3.4 Система Toolinspect II MCU

Модуль Toolinspect - це вбудована комп'ютерна система, яка як відомо, інтегрується в систему польової шини. Є різні цифрові інтерфейси для підключення до польових шин. Швидкість зчитування в реальному часі теж різна, при тому, що середнє значення 10 мс виправдало себе на практиці. Система сумісна з різними системами комп'ютерних числового програмного керування від BoschRexroth, Fanuc, Heidenhain або Siemens.

Дані приводу зчитуються з приводний шини, передаються і аналізуються по інтерфейсу Profi bus в модуль контролю технологічних процесів і стану інструментів Toolinspect.

Переваги:

- алгоритм контролю з можливістю самооптимізації
- просте управління за допомогою функціональних кнопок
- адаптивне регулювання процесів різання
- лише мінімальні модифікації для програми з ЧПУ
- досить короткого інструктажу оператора верстата

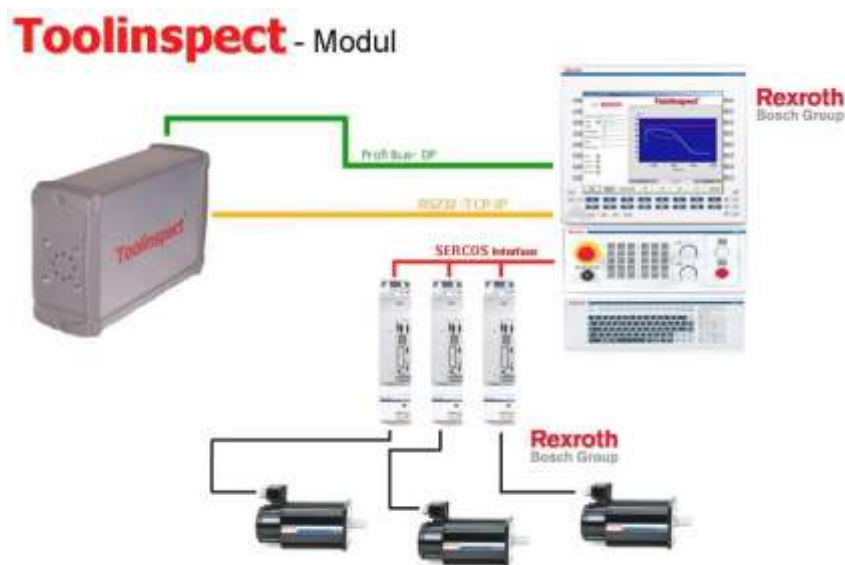


Рисунок 1.13 - Система спостереження Toolinspect II MCU

1.3.5 Приспособа Qass IM Optimizer 4D Toses

Застосування сучасного методу вимірювання (акустична емісія), заснованого на високочастотних імпульсах (HFIM - високочастотне вимірювання імпульсів), дозволяє виявити структурні зміни матеріалу в процесі обробки. Діапазон тестованих частот $120 \div 1300$ кГц. Шляхом порівняння поточного викиду з зареєстрованим стандартом у відповідному діапазоні допусків (рис.1.14). У разі характерних, виявлених імпульсів визначається їх причина. Висока частота дискретизації сигналу, аналіз спектру та інтерпретація програвача дозволяють виявити всі явища, що виникають під час обробки. Це називається акустичним відбитком пальців. Прилад корисний під час токарної, фрезерної та шліфувальної роботи.



Рисунок 1.14 - Застосунок Qass IM Optimizer 4D by Toses

1.3.6 Система MZ84 Mozys

Спеціалізована система збору даних (рис. 8), присвячена вібраційним вимірюванням, оснащена чотирма основними траєкторіями вимірювання (максимальна частота вибірки 100 кГц).

Можливе підключення п'єзоелектричних датчиків ІЕРЕ (інтегрована електроніка п'єзоелектриків). Внутрішня, доступна користувачеві пам'ять пристрою дозволяє самостійно вводити будь-яку стратегію обробки отриманих даних відповідно до розробленого алгоритму. Для роботи вам не потрібен зовнішній комп'ютер. Система повністю автономна і можлива до використання



Рисунок 1.15 - Система контролю вібрації MZ84 від Mozys

Здається, що найважливішим критерієм оцінки систем моніторингу / спостереження є ефективність виявлення несприятливих явищ, що виникають під час механічної обробки. Їх джерелом є взаємодія інструменту та заготовки, саме тому слід звернути особливу увагу на місце встановлення датчика, припускаючи, що чим ближче розташований датчик, тим діагностичний сигнал стає більш симптоматичним. Сучасні діагностичні системи найчастіше обробляють сигнали на основі аналізу частотного спектру, узгодженості сигналів вібрації у двох різних осях, виявлення змін сили різання з часом, порівняння оновлень амплітуди коливань або розширеного аналізу. Для того щоб отримана таким чином інформація принесла реальну користь у вигляді підвищення якості обробки, вони повинні активно впливати на параметри різання в процесі. Це означає, що

забезпечення реальної зв'язку між діагностичною системою та контролером NC є дуже важливим питанням. Тільки така взаємодія гарантує позитивні моніторингові ефекти, в даний час науково-дослідна діяльність зосереджена на пошуку більш складних стратегій та адекватних сигнальних заходів. З точки зору використання систем спостереження важливо, щоб така система:

- при аналізі сигналів враховувала динамічну модель машини, ефективно виявляла (в режимі он-лайн) вібрації самозбудження, а також ефективно коригувала параметри різання,
- була стійкою до перешкод обробного середовища,
- не знижувала жорсткість і можливості демпфування верстатів ,
- не обмежували допустимі параметри різання, геометрію інструменту та розміри заготовки.

1.4 Висновки

Аналіз сучасного ринку показує, що на ринку існують автоматизовані системи контролю вібрацій та управління режимами різання в реальному часі. Але вони мають високу вартість і складний спосіб реалізації, тому потребують покращення. Слід зазначити зростаючу динаміку ринку, так як з року в рік кількість верстатів з ЧПУ зростає, а складність деталей збільшується. Тому питання управління процесом різання за поточною інформацією є дуже актуальним. Для вирішення цієї проблеми потрібно зробити такі кроки:

1. Створити математичну модель процесу фрезерування, яка відповідає критеріям адекватності.
2. Створити метод, який дозволяє управляти процесом різання за поточною інформацією.
3. Розробити апаратний засіб для вимірювання коливань та управління процесом різання.

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ПІЗНАННЯ

2.1 Форми представлення математичних моделей

Моделювання – одна з основних категорій пізнання. На ідеї моделювання базується будь-який метод пізнання. Моделювання – це дослідження явищ, об'єктів шляхом заміни їх більш зручною для дослідження системою, тобто побудови та дослідження моделей. Методи моделювання мають наділяти модель здатністю відображати основні риси реального об'єкта, тобто встановлювати взаємо однозначну відповідність між моделлю і оригіналом [24].

Модель за визначенням, є лише подібністю до об'єкта оригіналу, в інформаційному плані модель бідніша – тому не може існувати поняття точної моделі. Модель – не дійсність, вона лише відображає дійсність. Ми можемо підвищувати точність моделі, наприклад, збільшуючи кількість і складність рівнянь, але все одно не досягнемо абсолютної точності [24].

2.1.1 Адекватність та ефективність математичних моделей

Описання якого-небудь процесу можливе тільки до певного рівня деталізації, тому будь-яке дослідження реального об'єкта зводиться до побудови моделі цього об'єкта. Математична модель повинна правильно, з необхідною повнотою й достовірністю відображати вихідний об'єкт, - від цього залежить успіх модельного дослідження. Питання про відповідність математичній моделі об'єкта-оригіналу належить до числа важливих у сфері модельної методології. Жодна, навіть найбільш довершена модель (в тому числі і математична) не може бути тотожною реальності. Модель, за допомогою якої вдається вивчити властивості реального об'єкта, називається адекватною об'єкту. Адекватність означає, що вимоги точності,

правильності, істинності моделі виконані лише тією мірою, яка необхідна для розв'язання даної задачі. В деяких випадках навіть удається ввести міру адекватності, тобто вказати спосіб, який визначає, яка з двох моделей більш наближена до об'єкта. Найбільш природним шляхом установлення адекватності моделей є їх практична експлуатація, тобто верифікація. Моделей реальних процесів або явищ можна здійснити лише шляхом порівняння результатів, які дає модель із реальними даними, а ступінь збігу цих результатів і визначає точність моделі. Адекватні моделі є, як правило, значним науковим досягненням [24].

Процес моделювання здійснюється в умовах діалектичної взаємодії двох протилежних сторін. З одного боку, потрібно більш повно й точно відтворювати в моделі властивості й характеристики об'єкта, тому слід враховувати максимум факторів, щоб не упустити суттєве. Наслідком такого підходу є зростання складності моделі – збільшується кількість змінних, кількість зав'язків, обсяг вихідних даних. Велика кількість змінних зменшує ступінь розуміння явища [24].

З іншого боку, модель повинна бути зручною для дослідження, тобто ефективною (економічною). Практика показує, що ефективність моделі знаходиться в оберненій залежності від її складності. Кожну додаткову змінну, кожен додатковий параметр у математичному описі об'єкта потрібно оплачувати високою ціною, тому деколи доводиться огрубляти модель, навіть якщо доведеться знехтувати деякою точністю. Найкраща якість моделей досягається як розумний компроміс між близькістю моделі до оригіналу (адекватністю) та простотою, що забезпечує зручність її використання (ефективністю) [24].

Надмірна точність моделей на практиці не менш шкідлива, ніж її неповнота. Оптимальне співвідношення точності й простоти моделі визначається багатьма факторами, серед яких домінує зміст задачі [24].

Математичним способом визначити співвідношення повноти та простоти не вдається через неможливість формалізувати ці фактори, тут важливу роль відіграють неформальні методи. Вибір кількості параметрів моделі є неформальним актом і ґрунтується на досвіді й інтуїції дослідника [24].

У випадку математичного моделювання визначальним фактором ефективності моделі є обраний математичний апарат. Прикладна математика надає досліднику широкий вибір математичних конструкцій, що можуть бути використані при побудові та дослідженні моделей. Але якість результатів залежить від того, наскільки вдало здійснено цей вибір [24].

З практики відомо, що час, який витрачається на розв'язування задачі, може коливатися в десятки разів у залежності від обраної моделі, від професійного рівня її постановки, від алгоритмів розв'язування, тому ефективність моделі залежить від суто суб'єктивного моменту, і чим складніший об'єкт, тим сильніша ця залежність [24].

2.1.2 Вимоги до математичних моделей

Повнота математичної моделі полягає в тому, що вона дає принципово нову можливість за допомогою математичних методів відобразити достатньою мірою саме ті характеристики й особливості об'єкта, які цікавлять дослідника. Наприклад, з рівняння, що описує динаміку системи кулька-пружина можна однозначно визначити частоту коливань, тому ця модель – повна, а для визначення амплітуди – неповна, оскільки потрібні додаткові дані.

Точність математичної моделі дає можливість забезпечити прийнятний збіг реальних і знайдених з моделі значень вихідних параметрів [24].

Вимога робастності означає стійкість моделі до похибок вихідних даних, тобто здатність нівелювати ці похибки. Дані можуть бути відомі лише

з більшою або меншою точністю і така ситуація не повинна суттєво впливати на результати моделювання [24].

Адекватність математичної моделі – це здатність правильно якісно й кількісно описувати ті характеристики об'єкта, які є важливими для поставленої задачі. Слід пам'ятати, що модель адекватна при виборі одних характеристик і не адекватна при виборі інших характеристик того ж об'єкта, тобто всіляка адекватність відносна і має свої межі застосування. Математична модель не може бути адекватною на всій множині значень параметрів. Завжди існує область адекватності моделі, яка задається діапазоном значень параметрів, у межах яких вона адекватна реальному об'єкту. Нехтування цим правилом може призвести до грубих помилок – приписування реальним об'єктам тих властивостей, якими вони насправді не володіють [24].

Ефективність. Модель повинна бути зручною для дослідження, тобто достатньо простою, але не простішою, ніж це можливо. Спрощення моделі можна проводити доти, поки модель продовжує відображати необхідні властивості процесів. Майже завжди є такі ситуації, коли в результаті спрощень можна одержати неправдоподібні результати [24].

Простота моделі досягається за рахунок того, що вона розглядає тільки деякі сторони об'єкта і може пояснити тільки те, що в неї закладено, причому часто тільки якісно або наближено кількісно. Для простоти необхідно враховувати лише суттєві фактори. Які фактори є суттєвими, а якими можна знехтувати залежить від особливостей розв'язуваної задачі та досвіду дослідника [24].

2.1.3 Лінеаризація математичних моделей

Аналіз будь-якої САУ можна провести тільки на основі її математичної моделі, яка подає систему з достатнім ступенем точності як у

статистиці, так і в динаміці. Наявність математичної моделі, взагалі кажучи, визначає наше знання про розглядуване явище. Математична модель складається у вигляді системи рівнянь, звичайно диференціальних, що зв'язують вхідні і вихідні величини досліджуваної системи або об'єкта, що управляється. Існує два основних підходи до складання математичних моделей. Перший базується на поданні опису системи, виходячи з фізичних законів, що відображають її поведінку. Такий підхід дозволяє отримати модель, найбільш адекватну на можливо широкому діапазоні модифікації вхідних в неї змінних. Другий підхід базується на дослідженні явища як «чорного ящика», коли на основі кореляційного аналізу і теорії планування експерименту будують модель, як правило, в заздалегідь вибраній формі. Тут потрібна велика обережність, щоб при обмеженій кількості статистичних даних вивести загальну закономірність. До відомого ступеня проілюструвати це положення можна словами, що навів П. Л. Капиця в своїй книзі «Експеримент, теорія, практика»: «Існує три види брехні: брехня, зухвала брехня і статистика». Однак цим підходом, не зважаючи на його недоліки, але пам'ятаючи про них, користуються в тих випадках, коли досліджують процеси або явища, що не мають поки ще достатнього фізичного пояснення [25].

Якщо всі рівняння математичної моделі лінійні, то всі основні характеристики досліджуваної САУ можуть бути отримані в аналітичній формі. Однак на практиці математичні моделі багатьох систем і об'єктів нелінійні, як правило, вони не мають аналітичних розв'язків і можуть бути досліджені спеціальними, наприклад, числовими методами. Тому при складанні математичної моделі бажано отримати рівняння системи в лінійному вигляді, а якщо це не вдається, їх лінеаризують. В роботі будь-якої системи можна виділити два режими: перехідний і такий, що установився. В режимі, що установився, система знаходиться у рівновазі, тобто всі похідні від координат, що установилися, дорівнюють нулю. Такий режим роботи називається сталим, але в системі може установитися і несталий режим, тому

для визначення цього режиму роботи використовують термін “що встановився”. Під лінеаризацією розуміють заміну точного нелінійного рівняння близьким лінійним. Основний метод лінеаризації базується на поданні системи у малих відхиленнях від їх значень, що установилися [25].

Нехай існує система, рух якої описується нелінійним рівнянням:

$$F(x_1, x_2, x_2', y, y', y'') = 0,$$

де x_1, x_2 - вхідні величини, y - вихідна величина, x_2', y', y'' - похідні за часом від відповідних вхідних і вихідних величин.

Лінеаризоване рівняння руху вихідної системи має вигляд:

$$\Delta F \approx \left(\frac{\partial F}{\partial x_1} \right)_0 \Delta x_1 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2} \right)_0 \Delta x_2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2'} \right)_0 \Delta x_2' + \left(\frac{\partial F}{\partial y} \right)_0 \Delta y + \left(\frac{\partial F}{\partial y'} \right)_0 \Delta y' + \left(\frac{\partial F}{\partial y''} \right)_0 \Delta y'' = 0$$

Отримане диференціальне рівняння так само, як і вихідне, описує рух досліджуваної системи, однак воно є приблизним (бо були відкинуті члени вищого порядку малості) і воно записане не відносно самих змінних, а відносно їх відхилень від значень, що встановилися. Оскільки $(\partial F / \partial x_1)_0$, $(\partial F / \partial x_2)_0$ - значення частинних похідних при всіх змінних, що відповідають точці лінеаризації (тобто це – коефіцієнти) то рівняння лінійним. Таким чином отримано лінійне рівняння у відхиленнях або варіаціях змінних [25].

2.1.4 Три форми представлення математичних моделей

Методи які були розглянуті для представлення математичних моделей які мають вигляд диференціальних рівнянь не одні. Найуніверсальніший метод є показ системи через змінні стану. Математичний опис через змінні стану опирається на термін стан системи. Вони характеризують те, як система буде себе вести в майбутньому за умови коли її стан визначений. А впливи, які прикладаються в поточний

момент часу також. Пояснити термін зіни стану можна на прикладі динамічної системи. Схема на рис.2.1.

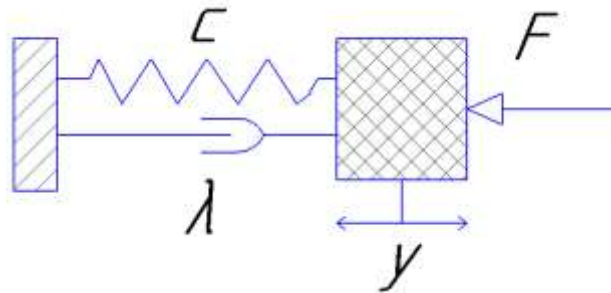


Рисунок 2.1 - Вихідна модель

Модель має масу m , яка зв'язаної з базою зв'язком із жорсткістю c і в'язким тертям λ . Рух системи такого типу можна описати даним рівнянням:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + \lambda \frac{dy}{dt} + cy = F.$$

Введемо як змінні ось ці величини:

$$x_1 = y; \quad x_2 = \frac{dy}{dt} = \frac{dx_1}{dt}.$$

Запишемо в іншому вигляді вихідне рівняння руху моделі:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2, \\ \frac{dx_2}{dt} = \frac{1}{m}F - \frac{\lambda}{m}x_2 - \frac{c}{m}x_1 \end{cases}$$

Використовуючи допомогу змінних стану модель можливо записати двома рівняннями першого порядку. Загалом будь яка модель може бути представлена таким чином. Для такої системи маємо [25 стр.17]:

Більш компактний запис:

$$y = Cx$$

Матриця y називається вихідним вектором, а матриця C – вихідною матрицею. Якщо вектор стану x має розмірність n , а система має m входів і p виходів, то матриці і вектори, наведені вище матриці мають такі розмірності відповідно [25]:

$$A \rightarrow n.n; B \rightarrow n.m; C \rightarrow p.n; x \rightarrow n.l; u \rightarrow m.l; y \rightarrow p.l$$

Потрібно сказати, що рівняння стану, позначені через формулу подаються як диференціальні. Через це якщо є можливість показати систему у вигляді сполучення звичайних елементів першого порядку, тоді є можливість з структурної схеми отримати уявлення стан. Така властивість може бути корисною.

2.2 Автоматичне управління процесом різання за поточною інформацією

Набутий досвід процесів утворення похибок при обробленні на ЧПУ верстатах говорить, що управління можна проводити за рахунок управління режимами різання або корекції еквідистанти з думкою стабілізації похибок. На практиці можуть працювати і комбіновані схеми, які поєднують в собі управління обробленням з коригуванням еквідистанти. За характером застосовуваної інформації методи автоматичного управління можна поділити [26].

Управління режимами різання за поточною інформацією. Метод передбачає створення САУ, замкненої через процес різання і працюючої використовуючи методи за помилкою. Не дивлячись на прийняті принципи управління цей метод має відмінність від інших методів які управляють формоутворюючими рухами. При цьому за безпосередню ціль управління обирають будь-який параметр процесу різання, що

контролюється та інтегрує в собі максимум інформації (в нашому випадку таким параметром є подача S). Таким параметром є, як правило, силовий фактор, що звичайно вимірюється через пружні деформації системи [26].

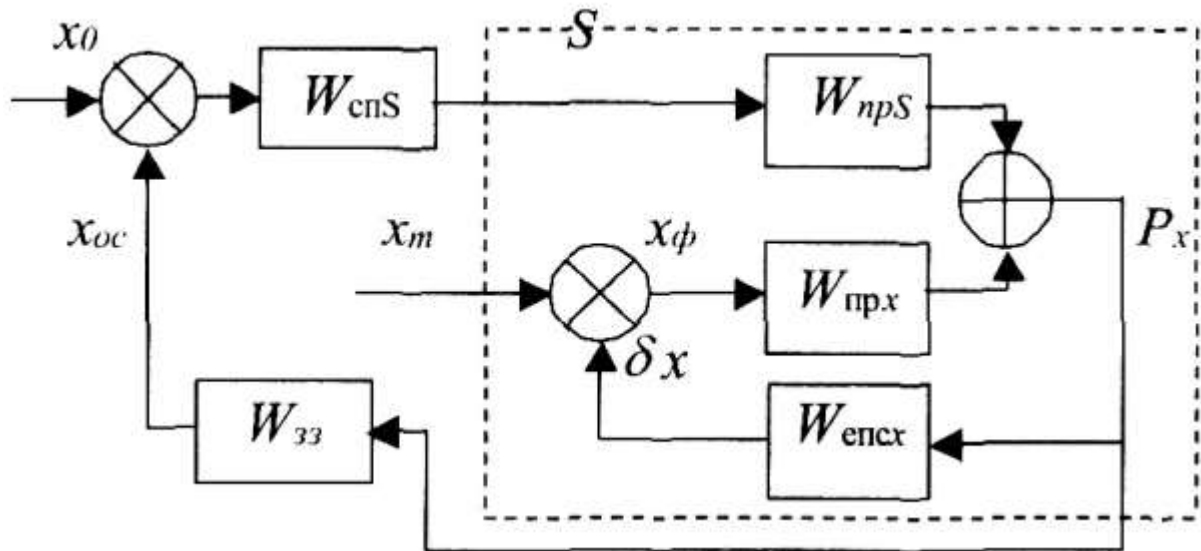


Рисунок 2.3 – Схема управління режимами обробки за поточною інформацією.

До САУ входить вимірювальний прилад зворотного зв'язку W_{33} і сервопривід подачі W_{cnS} . При постійному сигналі на вході x_0 САУ функціонує як система стабілізації деформації за рахунок управління подачею S . САУ замкнена і при її проектуванні обов'язковим є визначення умов сталості [26]. Для цього можна скористатися передаточною функцією:

$$W_{CAU} = \frac{W_{cnS}W_{npS}W_{enex}W_{npx}}{1 + W_{enex}W_{npx} + W_{enS}W_{npS}W_{enex}W_{npx}W_{33}}$$

Відзначимо, що метод потрібно застосовувати й для програмного управління будь-якими параметрами процесу в циклі обробки [26].

Механічне оброблення металів різанням є основним методом виготовлення деталей в машинобудуванні. Процес фрезерування при цьому є

найбільш універсальним та поширеним видом лезового оброблення. Цьому сприяють прагнення до скорочення та уніфікації технологічних операцій в процесі виготовлення деталі, а також поява нових верстатів с числовим програмним забезпеченням, що дозволяють обробляти деталі практично будь-якої складності. В той же час виросли вимоги до точності і якості поверхні виготовляємих деталей. В автомобільній, авіаційній та космічній промисловості точність деталей слугує одним із основних показників їх якості, а умови її забезпечення – найважливішою умовою надійності усіх технологічних систем. Основною передумовою зниження надійності і стабільності процесу різання є коливання в ТС як наслідок змінної за часом сили різання, так і внаслідок автоколивань, які зумовлюються динамічними характеристиками процесу різання.

Забезпечення надійності передбачає виконання двох умов: як максимум - виключення можливості виникнення коливань, як мінімум - зменшення їх амплітуди до прийнятного рівня, який визначається виходячи з вимог до якості отримуваної поверхні. Тому підвищення точності процесу фрезерування за рахунок врахування динамічних характеристик ТС «верстат - деталь» є актуальним завданням і становить значний практичний інтерес. Тому важливою проблемою є питання розробки компенсуючих пристроїв, або інтеграція їх у ТС, що дозволяє напряму керувати динамічними параметрами ТС за допомогою зміни значень параметрів режиму різання.

Через зміну сили різання в ТС виникають незатухаючі автоколивання, які мають великий вплив на сталість процесу різання. Автоколивання утворюються за рахунок енергії яка виникає через роботу ТС та розподіляється по ній. Великий вплив мають і такі фактори як перемінні сили тертя, демпфірування. Найбільш складні умови процесу різання спостерігаються при обробленні кутів замкнутих контурів. Потрібно враховувати зміну умов оброблення при переході з лінійної частини профілю до криволінійної, через зміну кута контакту та розміру шару, що зрізується.

Для математичного обґрунтування явищ які виникають при обробленні потрібно представляти ТС як динамічну систему зі зворотнім зв'язком. Це допоможе цілеспрямовано впливати на динаміку процесу різання. Для цього потрібно створити адекватну математичну модель процесу різання в замкненій ТС.

Отже, математична модель процесу різання повинна будуватись з урахуванням замкненості ТС і відтворенням найбільш впливових зворотних зв'язків. У якості вхідних величин приймаємо задані глибину різання H_z , подачу S_z і швидкість різання V_z . У якості вихідних величин – сили різання P_x , P_y , P_z . Таким чином процес різання може бути представлений функціональною схемою (рис.2.4).

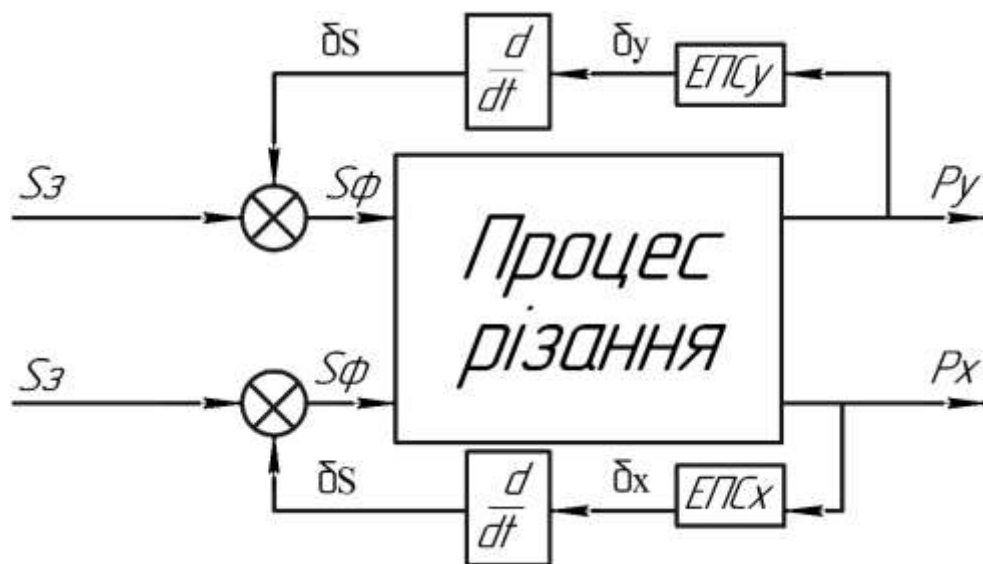


Рисунок 2.4 – Функціональна схема процесу різання

В цій схемі блоками представлено еквівалентні пружні системи (ЕПС), які відображають її реакцію на складові сили різання по осям координат δ_x , δ_y , δ_z .

Деформація $ЕПС_x$ позначена складовою δ_x . Швидкість її зміни впливає на фактичну подачу:

$$S_{\phi} = S_z - \frac{d\delta_x}{dt}$$

Швидкість зміни складової δ_y деформації ЕСП_y впливає на фактичну глибину різання. Деформація ЕПС_z представлена δ_z і впливає на фактичну швидкість різання:

$$V_{\phi} = V_3 - \frac{d\delta_y}{dt}$$

Наближено ми можемо представити ЕПС як одно масову систему, яка має два ступеня рухомості у відповідності до координатної системи XYZ, (рис.2.5).

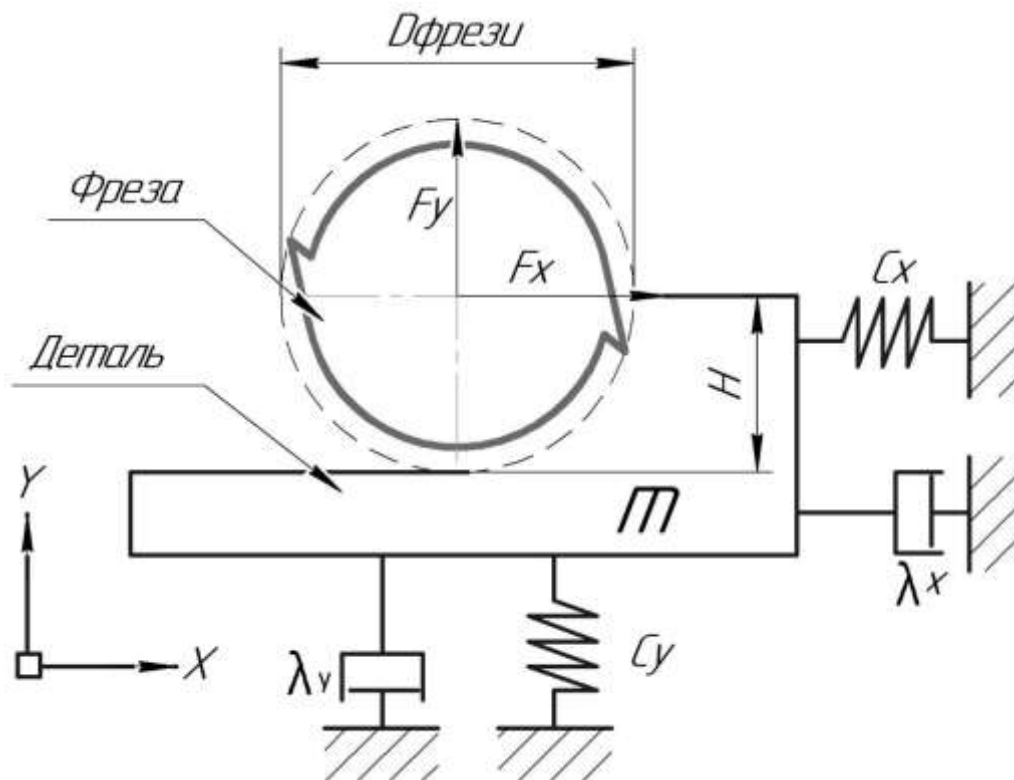


Рисунок 2.5 – Розрахункова динамічна модель

Зв'язок маси m з основою представлений коефіцієнтом в'язкого тертя λ і приведеною жорсткістю c по координатах. Тоді ми можемо описати рух системи за кожною координатою використовуючи диференціальні рівняння другого порядку:

$$\begin{cases} \frac{d^2\delta_x}{dt^2}m + \lambda_x \frac{d\delta_x}{dt} + c_x\delta_x = P_x(t) \\ \frac{d^2\delta_y}{dt^2}m + \lambda_y \frac{d\delta_y}{dt} + c_y\delta_y = P_y(t) \end{cases} \quad (2.1)$$

Для вирішення даної системи рівнянь можемо застосувати методи Рунге – Кутта, це великий клас чисельних методів розв'язання задачі Коші для звичайних диференціальних рівнянь і їх систем. Перші методи даного класу були запропоновані десь у 1900 році німецькими математиками К. Рунге і М. В. Кутти.

До класу методів Рунге-Кутти відносяться явний метод Ейлера і модифікований метод Ейлера з перерахунком, які представляють собою відповідно методи першого і другого порядку точності. Існують стандартні явні методи третього порядку точності, що не набули широкого поширення. Найбільш часто використовується і реалізований в різних математичних пакетах (Maple, MathCAD, Maxima) класичний метод Рунге-Кутти, що має четвертий порядок точності. При виконанні розрахунків з підвищеною точністю все частіше застосовуються методи п'ятого і шостого порядків точності. Побудова схем вищого порядку пов'язане з великими обчислювальними труднощами [27].

Метод Рунге-Кутти четвертого порядку при обчисленнях з постійним кроком інтегрування настільки широко поширений, що його часто називають просто методом Рунге – Кутта [27]. Розглянемо задачу Коші для системи звичайних диференціальних рівнянь першого порядку. ($y, f, k \in R^n$, а $x, h \in R^1$)

$$y' = f(x, y), \quad y(x_0) = y_0$$

Тоді наближене значення в наступних точках обчислюється по ітераційної формулою:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

Обчислення нового значення проходить в чотири стадії:

$$k_1 = f(x_n, y_n)$$

$$k_2 = f(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_1)$$

$$k_3 = f(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_2)$$

$$k_4 = f(x_n + h, y_n + hk_3)$$

Де h - величина кроку сітки по осі x .

Цей метод має четвертий порядок точності. Це означає, що помилка на одному кроці має порядок $O(h^5)$, а сумарна помилка на кінцевому інтервалі інтегрування має порядок $O(h^4)$.

2.3 Обробка даних вимірювань

2.3.1 Визначення частот власних коливань системи

Будь-яка механічна конструкція може бути представлена у вигляді системи пружин, мас і демпферів. Демпфери поглинають енергію, а маси і пружини - ні. Маса і пружина утворюють систему, яка має резонанс на характерній для неї власній частоті. Якщо подібній системі надати енергію (наприклад, штовхнути масу або відтягнути пружину), то вона почне коливатися з власною частотою, а амплітуда вібрації буде залежати від потужності джерела енергії і від поглинання цієї енергії, тобто демпфірування, властивого самій системі. Власна частота ідеальної системи маса-пружина без демпфірування дається співвідношенням:

$$\omega = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}}$$

де ω – власна частота коливань, c – коефіцієнт жорсткості пружини, m – маса.

Звідси випливає, що зі збільшенням жорсткості пружини збільшується і власна частота, а зі збільшенням маси власна частота падає. Якщо у системі є демпфер, а це так для всіх реальних фізичних систем, то власна частота буде нижче розрахованого за наведеною вище формулою значення і буде залежати від величини демпфірування.

Явище збігу частоти збуджуючої сили з власною частотою називається резонансом. При резонансі система коливається на власній частоті і має великий розмах коливань. При резонансі коливання системи зрушені по фазі на 90 градусів щодо коливань збудливою сили.

В до резонансної зони (частота збуджуючої сили менше власної частоти) зсуву фаз між коливаннями системи і збудливою сили немає. Система рухається з частотою збуджуючої сили.

У зоні після резонансу коливання системи і збуджуючої сили знаходяться в протифазі (зрушені один відносно одного на 180 градусів). Резонансні посилення амплітуди відсутні. При зростанні частоти збудження амплітуда вібрації знижується, однак різниця фаз в 180 градусів зберігається для всіх частот вище резонансної.

2.3.1.1 Ударне тестування

Щоб визначити власну частоту коливань системи доцільно провести тест ударом. Принцип ударного тестування складається в тому, що при збудженні механічної системи миттєво прикладеною силою відбувається збудження цієї системи по всім необхідним частотам. Оцінка модальних параметрів при ударному тестуванні виконується в припущенні, що дія на систему є імпульсною.

Для нанесення удару використовують спеціальний молоток (рис.2.6) з датчиком сили, який розташований в головній частині молотка. При цьому, для виміру відгуку може буди використаний любий датчик.

Слід зазначити спосіб нанесення ударів вимірювальним молотком. Силу удару необхідно регулювати таким чином, щоб з однієї сторони не пошкодити виріб, а з іншої – забезпечити високе значення коефіцієнту сигнал/шум в точці виміру. Крім того, після удару молотком не повинно виникати удару у відповідь об'єктом випробування по молотку. Для регулювання довжини ударного імпульсу молотка застосовують ряд наконечників, які дозволяють виміряти контактну жорсткість пари молоток-об'єкт. Кожен наконечник призначений для використання у визначеному частотному діапазоні (рис.2.7).

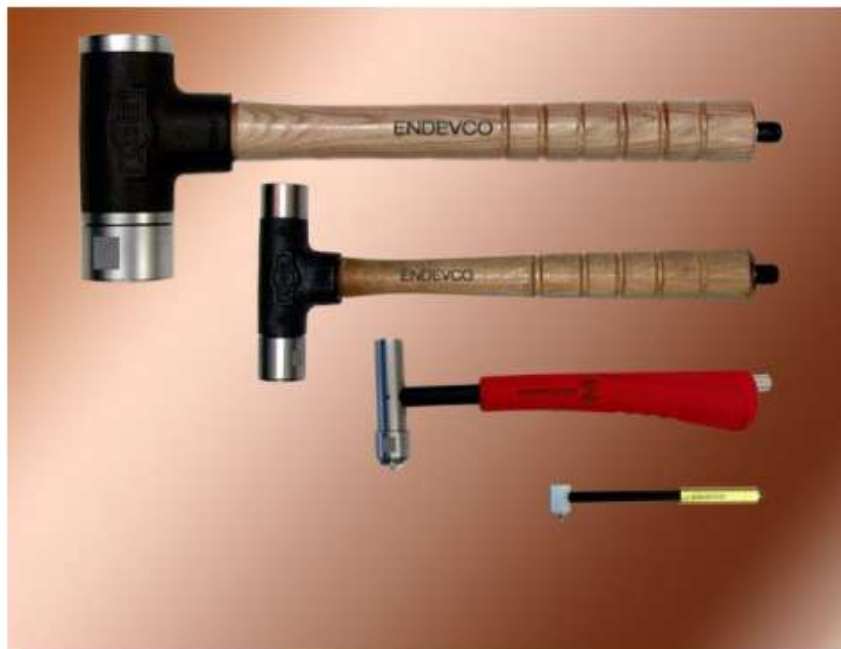


Рисунок 2.6 – Вимірювальні молотки для ударного тестування [30, 340 с.]

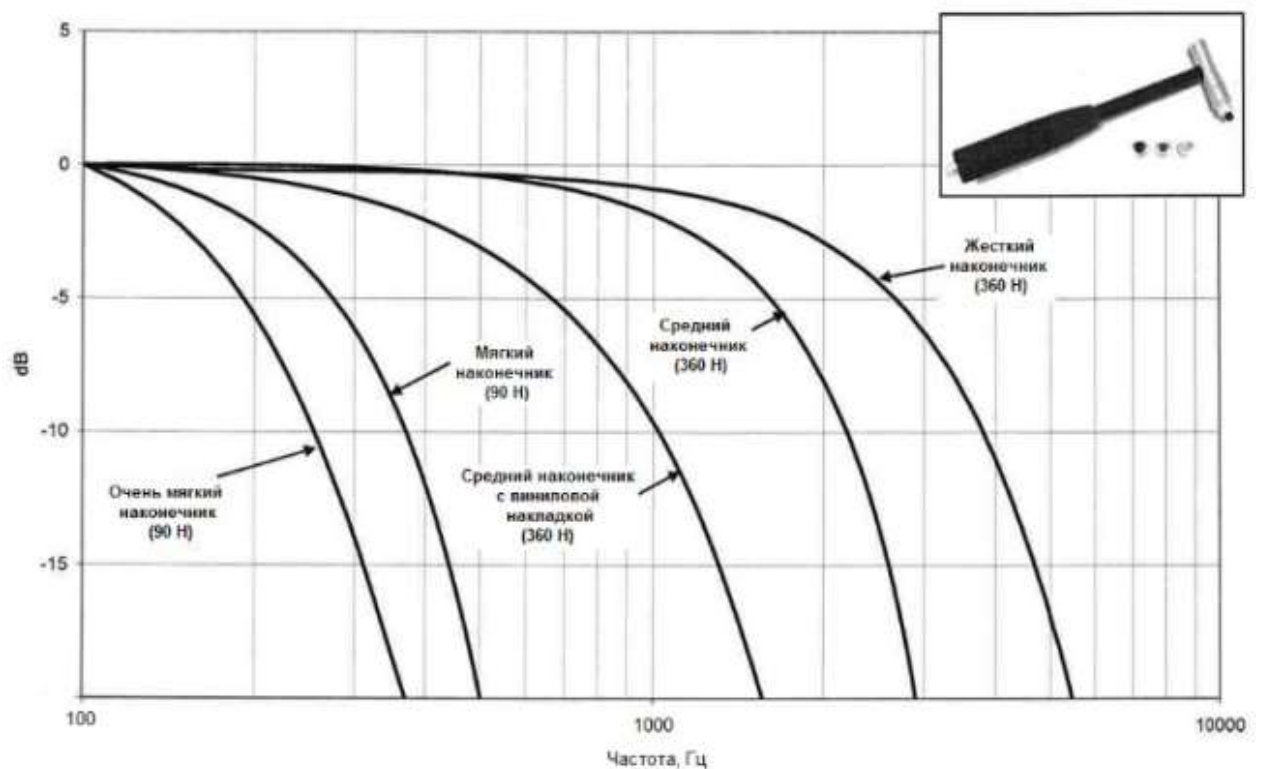


Рисунок 2.7 – Спектральна характеристика імпульсу при використанні різних наконечників вимірювального молотка [30, 340 с.]

Основною цілю ударного тестування є визначення передатної характеристики системи:

$$H_{(\omega)} = \frac{X_{(\omega)}}{F_{(\omega)}}$$

Передатна характеристика $H(\omega)$ представляє собою комплексне відношення між виходом і входом в частотній області. Фізично – це означає, що на гармонічну силу з частотою ω_0 виникає гармонічний відгук з тією ж частотою. Амплітуда на виході множиться на $|H_{(\omega)}|$. У випадку віброударного тестування в якості входу $F(\omega)$ виступає спектр сили удару, а в якості $X(\omega)$ спектр відгуку [31].

2.3.2 Інтерполяція даних

Показники датчика мають нерівномірний крок вимірювання по осі, тому потрібно провести інтерполювання даних . Для цього потрібно

використати принцип лінійної інтерполяції [28]. Даний методу полягає у інтерполяції алгебраїчним двочленом виду:

$$P_1(x) = ax + b$$

функції F , що задана в двох точках x_0 та x_1 лінії $[a,b]$. У разі задання значення у декількох точках функцію необхідно замінити на відрезку лінійною. [28].

Даний метод полягає в заміні графіка функції F прямої, яка пересікає точки $(x_0, f(x_0))$ та $(x_1, f(x_1))$ (рис.2.8).

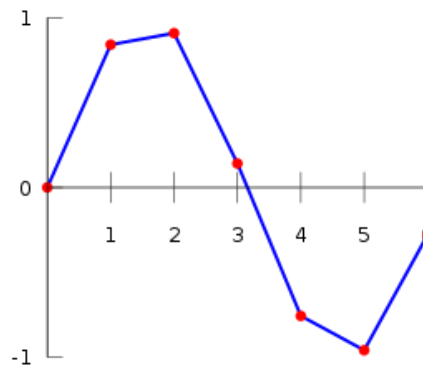


Рисунок 2.8 – Метод лінійної інтерполяції

Рівняння може мати вигляд:

$$\frac{y - f(x_0)}{f(x_1) - f(x_0)} = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}$$

Звідки $x \in [x_0, x_1]$, тому формула лінійної інтерполяції має вигляд:

$$f(x) \approx y = P_1(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} (x - x_0)$$

При цьому:

$$f(x) = P_1(x) + R_1(x)$$

де $R_1(x)$ – похибка формули:

$$R_1(x) = \frac{f''(\psi)}{2} (x - x_0)(x - x_1),$$

$$\psi \in [x_0, x_1]$$

також справедлива оцінка:

$$|R_1(x)| \leq \frac{M_2}{2} \max |(x - x_0)(x - x_1)| = \frac{M_2 h^2}{8}$$

$$M_2 = \max |f''(x)|$$

$$h = x_1 - x_0$$

2.3.3 Фільтрація шумів

Через те, що під час запису результатів на осцилограмах виникають шуми, для подальшого їх опрацювання потрібно скористатись фільтрами. Існує декілька видів фільтрів, але на практиці найчастіше застосовують:

- **Експонентний фільтр.** Експоненціальне згладжування можна уявити як фільтр, на вхід якого послідовно надходять члени вихідного ряду, а на виході формуються поточні значення експоненціального середнього значення. Фільтрація сигналів даним фільтром в спокійному стані виглядає задовільно, як і фільтрація плавних рухів. Але вона абсолютно незадовільна при фільтруванні сигналів, отриманих при різанні.
- **Фільтр нижніх частот.** Фільтр нижніх частот (ФНЧ) – це частотно-чутлива схема, яка пропускає деякий діапазон частот до визначеної частоти. Всі інші частоти які знаходяться вище полоси пропускання значно придушуються. Фільтр нижніх частот представляє собою схему, яка без змін передає сигнали нижніх частот, а на високі забезпечує затухання сигналів і запізнення їх відносно вхідних сигналів.
- **Фільтр Калмана.** Використовує динамічну модель системи (наприклад, фізичний закон руху), відомі дії, що управляють і безліч послідовних вимірювань для формування оптимальної оцінки стану. Алгоритм складається з двох повторюваних фаз: передбачення і коригування. На першому розраховується прогноз стану в наступний момент часу (з врахуванням неточності їх вимірювання). На другому, нова інформація з

датчика коригує передбачене значення (також з врахуванням неточності і зашумленості цієї інформації). Рівняння представлені в матричній формі.

- **Медіанний фільтр.** Медіанна фільтрація – дуже часто вживаний метод попередньої обробки сигналів. Специфічною особливістю медіанний фільтрів є вибірковість по відношенню до елементів масиву, які представляють собою немонотонну складову послідовності чисел в межах вікна (апертури) фільтра, і різко виділяються на тлі сусідніх відліків. У той же час на монотонну складову послідовності медіанний фільтр не діє, залишаючи її без змін. Завдяки цій особливості, медіанний фільтри при оптимально обраної апертурі можуть, наприклад, зберігати без спотворень різкі межі об'єктів, ефективно пригнічуючи некорельовані або слабо корельовані перешкоди і малорозмірні деталі. Ця властивість дозволяє застосовувати медіанну фільтрацію для усунення аномальних значень в масивах даних, зменшення викидів і імпульсних перешкод. Характерною особливістю медіанного фільтра є його нелінійність. В роботі рекомендується застосовувати медіанний фільтр.

2.3.4 Перетворення Фур'є та обробка спектру коливань

Перетворення Фур'є — операція, яка співставляє одій функції речової змінної іншу функцію рахової змінної. Ця нова функція описує коефіцієнти (амплітуди) при розкладі вихідної функції на елементарні складові – гармонічні коливання з різними частотами. [32].

Для даних отриманих у попередньому експерименті потрібно провести перетворення Фур'є, та визначити власну частота коливань по осі X та Y .

2.3.5 Вимірювання жорсткості системи

Сила різання не являється постійною, і залежить від параметрів оброблення. Через зміну сили різання змінюються і пружні деформації. Через

це похибка оброблення, яка обумовлена дією пружних деформацій також змінна. В технологічній системі пружні деформації з точки зору точності оброблення являються визначальними, тому похибки, обумовлені ними можуть досягати 20-80% від сумарної похибки оброблення.

Статичну жорсткість деталі визначають наступними методами:

1. Аналітично (розрахунок по формулам опору матеріалів)
2. Методом кінцевих елементів в програмному комплексі ANSYS
3. Експериментально

Суть статичного експериментального методу полягає в тому, що на певні вузли верстату прикладають силу, яка відтворює силу різання. Це роблять за допомогою спеціальних пристроїв, наприклад динамометра (рис.2.9). При цьому переміщення вузлів верстату вимірюють за допомогою індикаторів. Важливо прикладати силу в напрямку, нормальному до оброблюваної поверхні, бо ці переміщення мають основне значення в утворенні похибки оброблення, яка обумовлена пружними деформаціями технологічної системи.

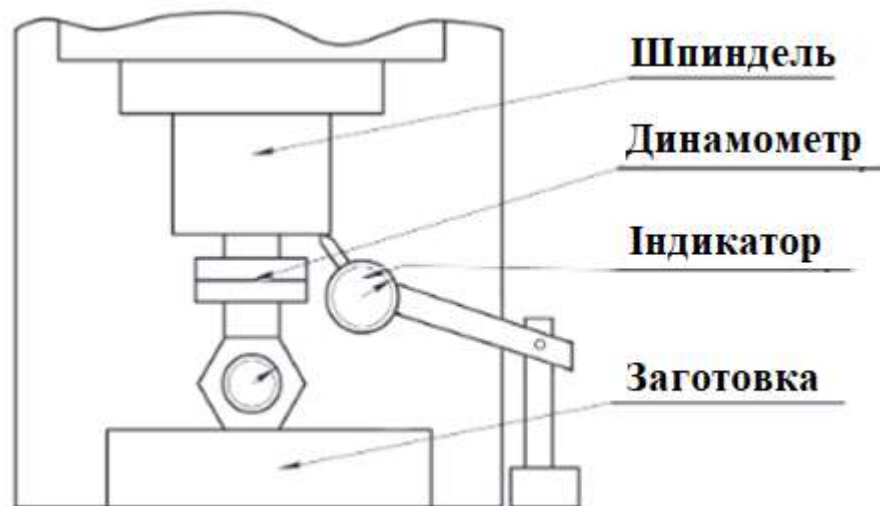


Рисунок 2.9 – Визначення жорсткості технологічної системи

Далі отримані дані наносять на графік у вигляді точок і одержують навантажувальну криву характеристики жорсткості верстату. Потім

навантаження зменшують і таким чином отримують розвантажувальну криву. Форма цих кривих – петля гістерезису, величина запізнюючих деформацій, лінійність характеристики и т.д – є діагностичним сигналом про стан пружної системи верстату (рис.2.10).

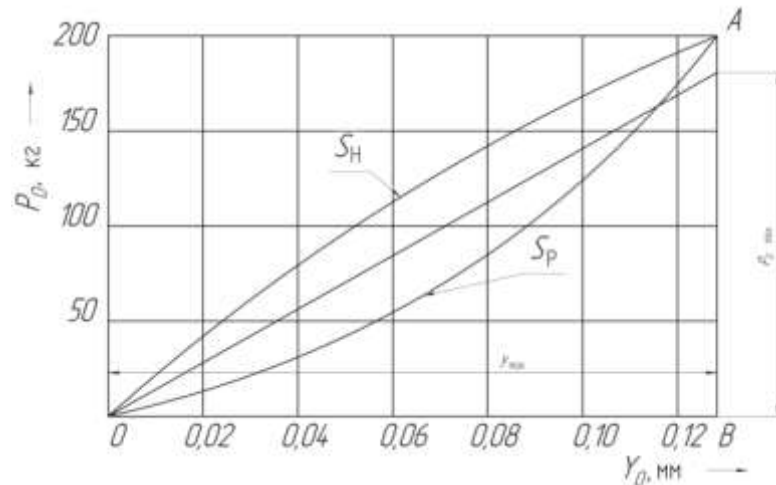


Рисунок 2.10 – діаграма визначення жорсткості технологічної системи

Для практичного оцінювання стану технічного застосовують статичний спосіб. Такий метод корисний на виробництві, він дозволяє проводити після ремонту обладнання технічний контроль

Закон Гука:

$$J = \frac{Q}{\Delta}$$

де Q - модуль сили, який має вплив на компоненти техн. системи ; Δ – загальні переміщення вузлів технологічної системи, яка визначається в такому ж самому напрямку .

Розрахунки проводимо для осі X та Y.

2.3.6 Визначення декременту коливань

Декремент коливань – це величина, яка показує те, з якою швидкістю зменшується амплітуда гармонічних коливань з деяким часом при зменшенні коливань рис.2.11. Він задається формулою:

$$u = u_0 e^{-\lambda t} \cos(\omega t - \varphi)$$

Де, λ – коефіцієнт затухання,

u_0 – амплітуда в початковий момент часу,

ω – частота коливань

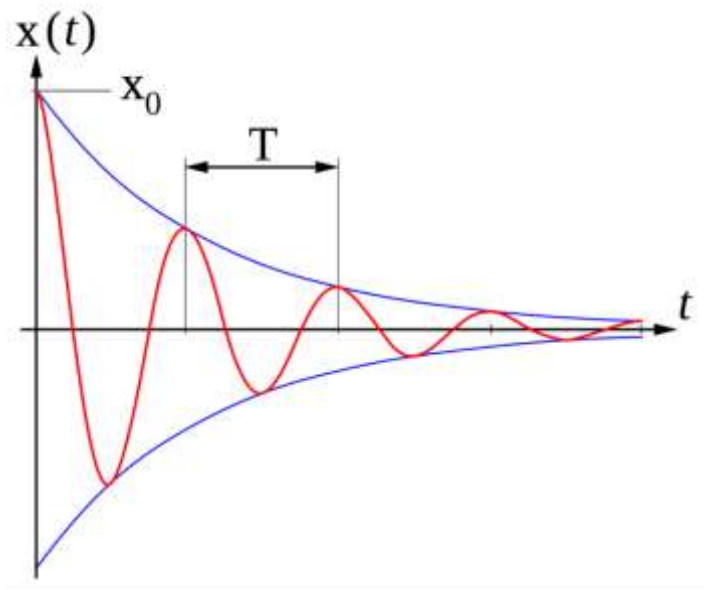


Рисунок 2.11 – Приклад кривої графіка затухаючих коливань

2.3.7 Розрахунок приведеної маси

Приведена маса розраховується із залежності:

$$\omega = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}}$$

Приведена маса визначається, як:

$$m = \frac{c}{(2\pi\omega)^2}$$

2.4 Метод управління процесом різання

З приведеного вище зрозуміло, що параметри m , c та λ визначаються до процесу різання. У процесі різання нам відомі лише миттєві значення P_x і P_y складових сили різання, що знімаються з динамометричних датчиків. Кінцевою метою є отримання обробленої поверхні з наперед заданими розмірами. А оскільки виміряти деформації в процесі різання в конкретній точці технічно неможливо, то у даній роботі було прийнято наступне рішення. За приведеною вище математичною моделлю (формула 2.1) розраховується теоретична деформація пружної системи δ і порівнюється з наперед заданим граничним $[\delta]$. При виході за допустиму межу, слід впливати на силу різання через подачу, за відомими залежностями з теорії різання.

Для реалізації даної ідеї необхідно:

- отримувати дані про складові сил різання в реалічному часі;
- обчислювати систему диференціальних рівнянь з метою визначення деформацій;
- при виході за допустимі межі деформацій, здійснювати перерахунок сили різання та подачі;
- вводити корекцію подачі в реальному часі.

Очевидно, що для реалізації цих пунктів необхідно виконувати паралельні обчислення з різанням, а тому стійку верстата з ЧПК слід синхронізувати з окремим комп'ютером:

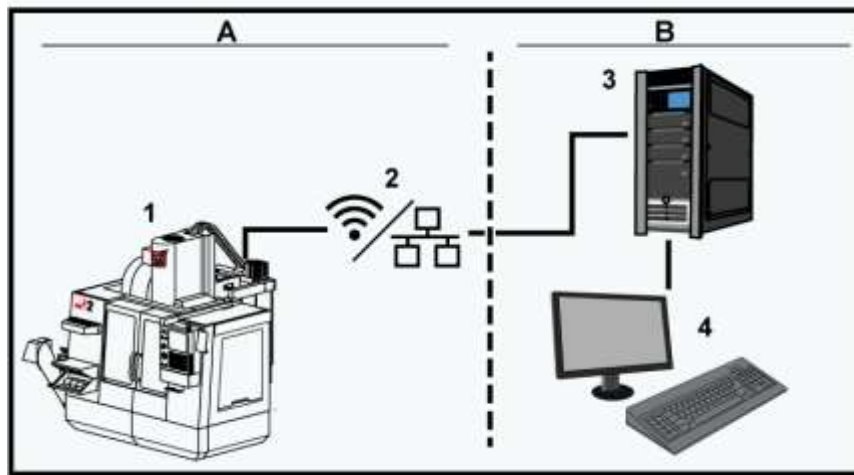


Рисунок 2.12 - Сучасні верстати HAAS підтримують можливість віддаленого підключення до мережі Internet [34]

Збір даних верстату

Збір даних верстату дозволяє використовувати команди Q і E для отримання даних з системи управління через Ethernet-порт або бездротову мережу. Віддалений комп'ютер може також задавати певні макрозмінні. В системі управління Haas використовується сервер TCP для обміну даними в мережах. На віддаленому комп'ютері можливо використовувати будь-яку термінальну програму, яка має підтримку TCP.

Запити збору даних і команди

Можна запросити значення будь-якої макрозмінної або системної змінної за допомогою команди Q600, наприклад Q600 xxx. При цьому на віддаленому комп'ютері буде виведено зміст макрозмінної xxx.

Формат запиту. Правильний формат запиту - ?Q###, де ### - номер запиту, який закінчується новим рядком.

Формат відповіді. Відповідь від системи управління починається з > і закінчується /r/n. Успішні запити вертають назву запиту, а потім запитувану інформацію, яка розділена комами.

У такий спосіб очевидним стає мета програмного продукту: у кожен кадр управляючої програми замість конкретного значення подічі $F<число>$ вставити макрозмінну, наприклад $F\#<макрозмінна>$ значення якої буде перезаписано з зовнішнього інтернет-підключення E -командою.

Програминий код для підключення до стійки HAAS та зчитування/запису макрозмінних представлений в наступному лістингу:

https://github.com/korenkov/haas_mdc

```
import os, re, time, telnetlib

class parametr:

    def __init__(self, name, command):
        self.name = name          # custom name of macro variable
        self.command = command    # 4-digit macro variable number
        self.value = None         # result of measuring
        self.__pattern = re.compile('[\+]?[0-9]*\.[0-9]+', re.IGNORECASE)

    # parsing of string & convert value to float number
    # for example: text=">>MACRO, -182.633216" ==> self.value=-182.633
    def set_value(self, text):
        self.value = round(float(self.__pattern.findall(text)[0]), 3)

# Network configuration
host = '172.21.16.35'
port = 5051
timeout = 5 # timeout in seconds

telnet = telnetlib.Telnet()

# Connection to CNC
try:
    telnet.open(host, port, timeout)
except Exception as err:
    telnet.close()
    print ('Connection time out')
    print(err)

# Set HAAS macro or system variables
variables = []
variables.append(parametr('x', 5021))      # Current X position
variables.append(parametr('y', 5022))      # Current Y position
variables.append(parametr('z', 5023))      # Current Z position
variables.append(parametr('s', 3027))      # Spindle RPM
variables.append(parametr('timer', 3001))  # Millisecond timer

# Measuring with timeout=0.01 sec & write log-file
try:
    file = open('monitoring.log', 'w')

    while True:
        for item in variables:
            # send request
            telnet.write('?Q600 %s\r' % item.command)
            # get response: read all symbols & parse
```



```

        item.set_value(telnet.read_until('\r'))

# output result as formatted string
s = ''
for x in variables:
    s += '{:>12}'.format( x.value )

file.write(s + '\n')
print(s)

time.sleep(0.01)

# If press CTRL-C in terminal (exit from loop)
except KeyboardInterrupt:
    file.close()
    telnet.close()
    print("Caught KeyboardInterrupt exception")

# Close record & connection
file.close()
telnet.close()

```

Єдиною перешкодою на шляху даного рішення є те, що подачу можливо змінити лише один раз в межах одного кадру! Оскільки кадр програми може задавати досить велике переміщення, під час якого можливі скачки сил різання, то очевидно що відпрацювати їх буде неможливо. Рішенням даної проблематики є використання свого роду постпроцесора – ще однієї програми, яка опрацьовує початковий G-код, у якому один кадр лінійного переміщення перетворює на n-кадрів з першим кроком. Умовно це можна зобразити наступним лістингом:

G00 X0 Y0		G00 X0 Y0
G01 X0 Y100. F300.	⇒	G01 X0 Y1. F#10
		G01 X0 Y2. F#10
		G01 X0 Y3. F#10
		...
		G01 X0 Y100.
		F#10

2.5 Висновки

1. Описані форми представлення математичних моделей і вимоги до них.
2. Розроблена математична модель процесу фрезерування, яка враховує коливання ТС в просторі по двом координатам одночасно.

3. Запропонований метод чисельного вирішення складеної математичної моделі за допомогою методу Рунге – Кутта 4-го порядку.
4. Представлений алгоритм оброблення даних вимірювань.
5. Створений метод управління процесом різання.

РОЗДІЛ 3 АПАРАТНІ ЗАСОБИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КОЛИВАНЬ ТА УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ РІЗАННЯ

3.1 Акселерометр

Акселерометр – це механічний пристрій, який дозволяє визначити проекцію прискорення. В найпростішому представленні він представляє собою грузик, який закріплений на пружному підвісі. При його відхиленні від початкового положення на пружному підвісі можливо визначити напрям зміни положення, а також величину прискорення. Рисунок найпростішого акселерометра показаний на рис.3.1.

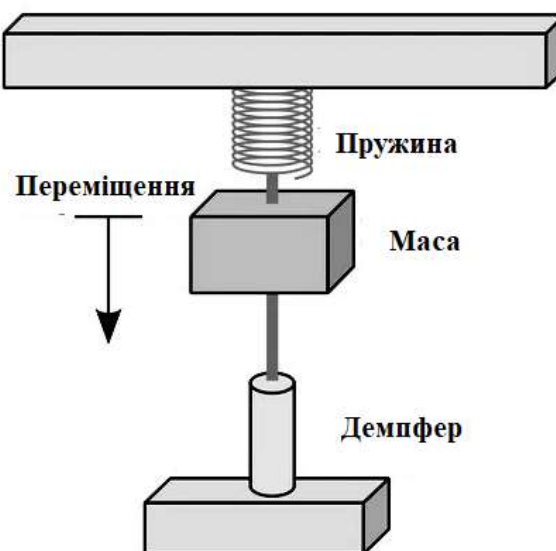


Рисунок 3.1 – Простий акселерометр

Існує три різновидності акселерометрів. Вони бувають одновісні, двухвісні і трьохвісні. Найбільш часто використовують трьохкомпонентні пристрої. Вони мають можливість вимірювати проекцію прискорення в трьох прощинах.

Механічний акселерометр є самим простим і повністю відповідає класичній конструкції, яка була придумана початково. В ній підвішаний вантаж кріпиться на еластичному підвісі. При зміні положення корпусу пристрою під дією інерції підвішане тіло компенсує перекіс, тим самим

діючи на пружину на якій він кріпиться. В результаті чого спеціальний механізм визначає подібні коливання і переводить їх в показник лінійного прискорення.

Електронні акселерометри передбачають суміщення механічних частин пристрою з датчиками. Вони дозволяють здійснити більш точні і швидші виміри параметрів переміщення положення закріпленої маси. Подібні пристрої в рази більш компактні, і зовнішнє можуть представляти собою мініатюрний чіп для мікросхеми, габарити якого не перевищують розмір ногтя.

П'єзоелектричні мають всередині твердий стержень, який постійно знаходиться під тиском і діє на пьезокристал. В результаті вібрації здійснюється вироблення електричного струму. Вимірюючи параметри напруги здійснюється визначення фактичних показників прискорення.

Термальні акселерометри мають в своїй конструкції мініатюрний міхур повітря. При прискоренні він нахиляється від свого положення, що фіксується чутливими датчиками

При роботі акселерометра можуть виникати відхилення показників його вимірів. На це в першу чергу можуть впливати вологість і температура довкілля. Це змінює властивості матеріалів, які застосовуються при виготовленні пристроїв. Також похибки створюють зовнішні магнітні поля. Для мінімізації цього явища конструкції датчиків можуть мати різноманітні технічні доповнення. Також похибка вимірювань виходить в результаті вібрації об'єкта вимірювань

В роботі пропонується використовувати акселерометр ADXL345. Схема підключення і зовнішній вигляд показані на рис.3.2 а монтаж – на рис.3.3.

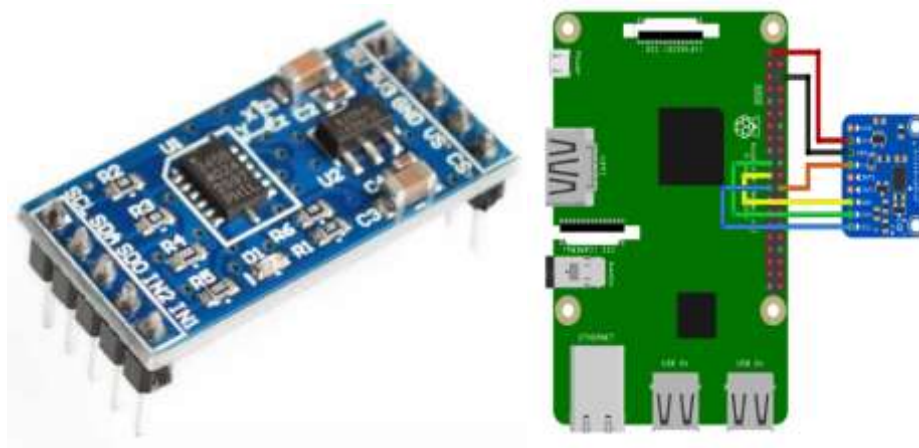


Рисунок 3.2 – Зовнішній вигляд і схема трьохосьового акселерометра ADXL345

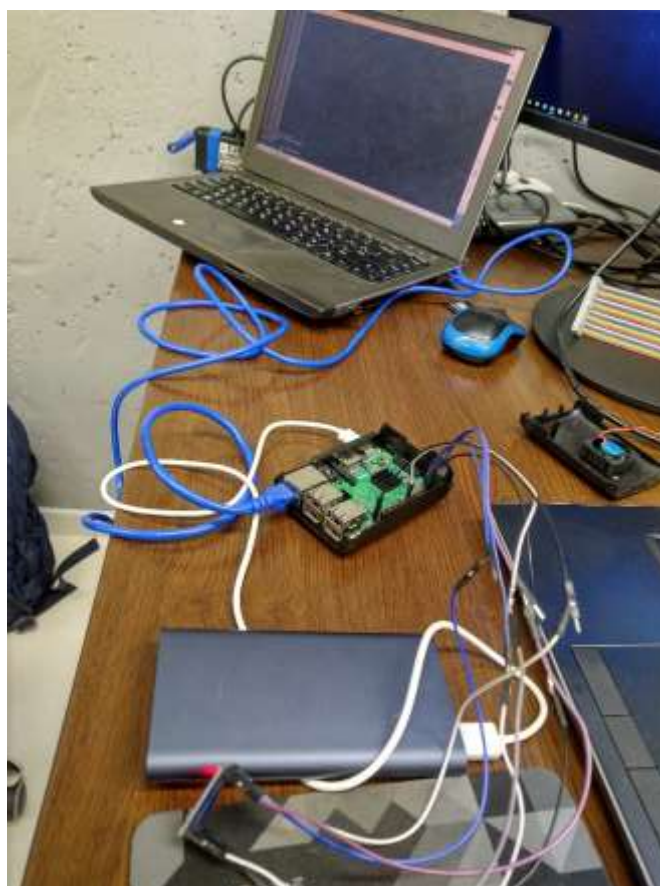


Рисунок 3.3 – Акселерометр зібраний на Raspberri

3.2 Динамометр

Тензометричні датчики сили представляють собою гнучке тіло, яке під впливом діючою сили піддається лінійній деформації. На відповідних місцях тіла приклеєні чутливі елементи, так називаємі тензометри. Тензометр – це резистивний елемент, електричний супротив якого внаслідок механічної деформації (розтягу або стиску) змінює своє значення. Діюча сила таким чином сприяє зміні електричного опору. На датчику зазвичай розташовано чотири тензометра, які включені в мостову систему для того, щоб зміну опору було легше визначити.

За описаним принципом функціонують датчики з металевими тензометрами. Існують також інші принципи і типи датчиків, наприклад датчики з напівпровідниковими тензометрами. Напівпровідникові тензометри виготовляють з кремнію, поцьому їх чутливість значно вище, ніж у металевих. Однак вони дуже сильно залежать від температури і тому використовуються тільки в спеціальних випадках. На іншому принципі працює п'єзоелектричний датчик сили. Він використовує п'єзоелектричне явище, тобто виникнення напруги в кристалі при механічному зусиллі. За допомогою п'єзоелектричного датчика вимірюють динамічні сили, а для через виміри статичних сил він не застосовується. Існують й інші види датчиків, наприклад, вібраційні, гідравлічні, електродинамічні, магнітопружні і т.д. Однак жоден з них не застосовується так широко, як датчики з металевими тензометрами.

В даній роботі був розроблений експериментальний стенд для вимірювання вібрацій і сил різання. Складальне креслення пристрою представлено (рис.3.4). А на рис.3.5 показана схема встановлення пристрою на верстаті.

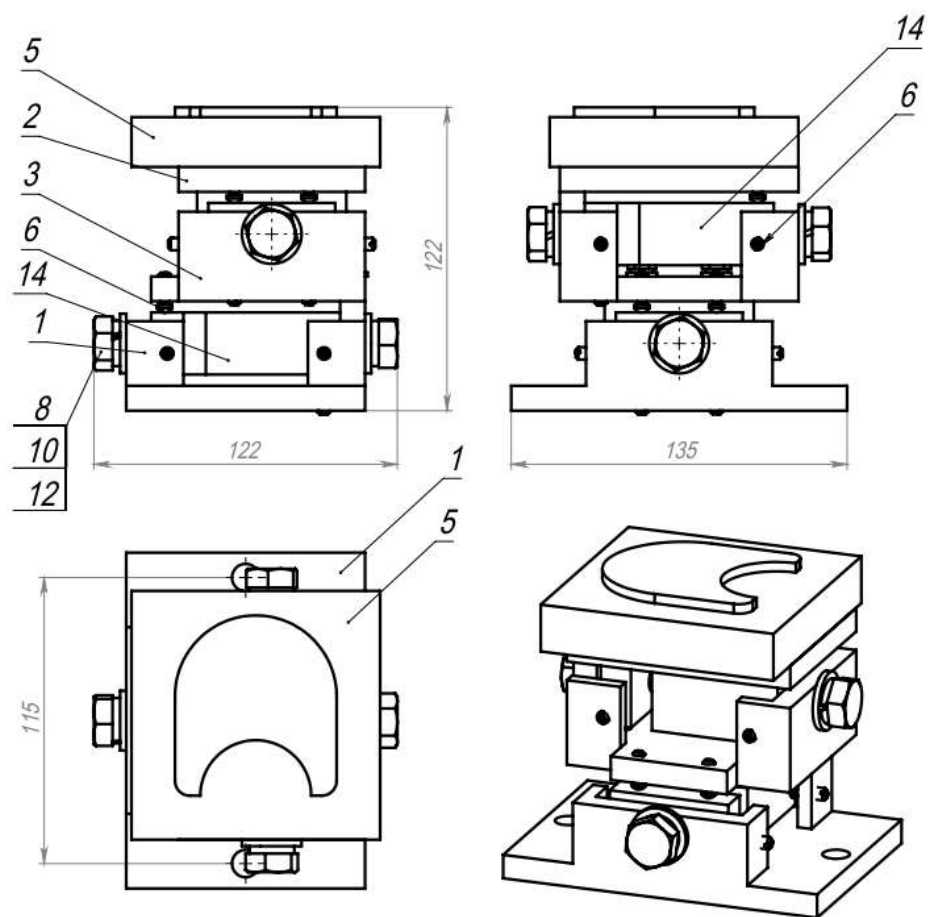


Рисунок 3.4 – Пристій для вимірювання частоти коливань і сили різання при фрезеруванні

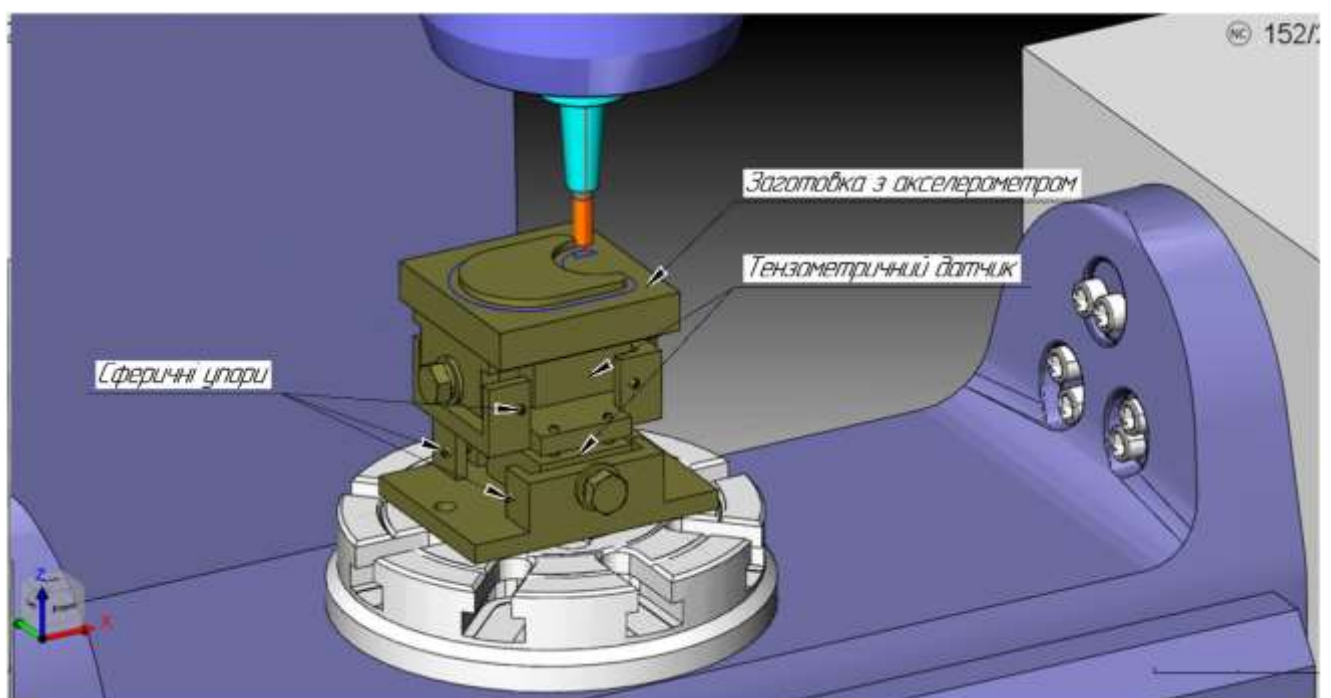


Рисунок 3.5 – Схема встановлення пристрою на верстаті.

Пристрій складається з пластин 1, 3 до яких прикручені тензометричні датчики сили 14 за допомогою болтів 8, 10, 12. Сферичні упори 6 слугують для того, щоб датчик під час процесу різання сприймав тільки осьові навантаження в координатах X, Y і не фіксував крутні моменти. Акселерометр фіксується на заготовці 5. Пристій встановлюється на фрезерний верстат і кріпиться за допомогою двох отворів до столу.

Тензометричні датчки фірми Zemic H3-C3-200kG-B3 (рис.3.5), акселерометр моделі ADXL345.



Рисунок 3.5 – Тензометричний датчик Zemic H3-C3-200kG-B3

Датчики аналогові, тому сигнал з них потрібно оцифрувати. Для цього потрібен аналогово-цифровий перетворювач (АЦП). Схема підключення датчиків наведена на (рис.3.6).

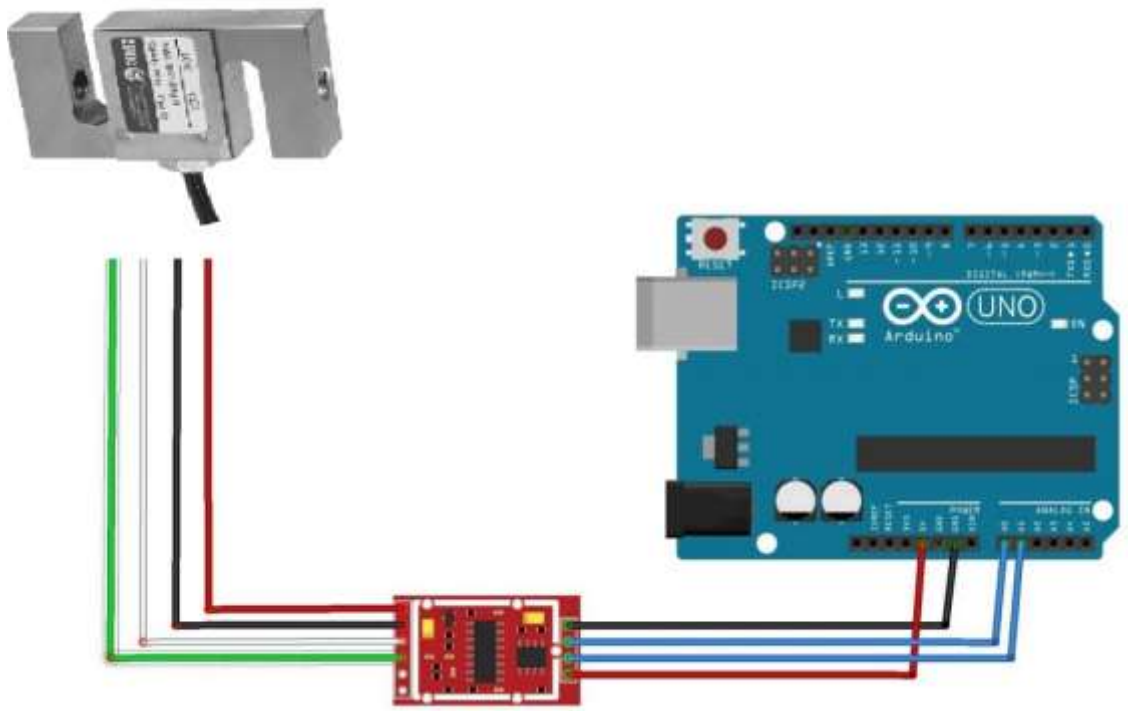


Рисунок 3.6 – Схема підключення датчика Zemic H3-C3-200kG-B3

3.3 Альтернативні апаратні засоби

Мікрофони є недорогим рішенням для виявлення вібрацій при обробленні. Недоліками мікрофонів є високий рівень шумів і важкість в виявленні коливань з частотами нижче 100 Гц.

Перевагами індуктивних датчиків є їх безконтактний принцип роботи, який в відмінності від акселерометрів не викривляє динамічних характеристик вимірюємого об'єкту. Крім цього сигнал з акселероматра пропорційний віброприскоренню коливань, що в свою чергу потребує перерахунку в амплітуду. Недоліком індуктивних датчиків є неможливість виміру високочастотних коливань (вище 730-3000 Гц в залежності від типу і розміру датчика).

Перевагою тензодатчиків є їх відносна простота, малі розміри і низька вартість. До недоліків можна віднести високий рівень шумів. Крім цього, не

вдалося знайти в літературі відомостей по максимальним частотам коливань, які можуть фіксувати тензодатчики.

Таким чином, роздивившись різні типи датчиків, можна зробити висновок, що для дослідження коливань найбільше підходять акселерометри, індуктивні датчики і динамометри.

3.4 Висновки

1. Розглянуті переваги і недоліки апаратних засобів для вимірювання коливань і сил різання.
2. Аналіз показав, що акселерометри і тензодатчики своїми характеристиками задовольняють цілі експерименту.
3. Розроблені схеми підключення.

РОЗДІЛ 4 СТАРТАП

Стартап як форма інвестицій, ризикового підприємництва і венчурних вкладів набула широкого розповсюдження впродовж останніх десятиліть. Це зв'язано з появою Інтернету, який використовується як інструмент комунікацій та продажу нових ідей. Це сприяє більш легкому пошуку інвесторів і споживачів, пошуку ресурсів. Інтернет майже стирає кордони між різними країнами. Стартап проекти за рахунок інновацій, мобільності та гнучкості сприяють зростанню кількості інноваційних ідей.

Стартапом зараз називають практично любий проект, який якимось чином зв'язаний з новими технологіями (але не обов'язково), який має потенціал до росту і в майбутньому може стати високодохідним або масовим бізнесом з мільярдною вартістю. І саме під ці очікування, різного роду інвестори готові вкладати в стартапи гроші.

Великий ріст і тренд стартап проектів разом зі стагнацією класичних ринків роблять стартапи дуже привабливими для інвестицій. При цьому, із кожної тисячі стартапів, дев'ятсот банкрутують в перші декілька місяців так і не вийшовши з «голої» ідеї. Із сотні, що залишилася – дев'яносто, по тим чи іншим причинам вмирають на протязі року. А із залишившись десяти стартап проектів буде добре якщо хоча б один стане дійсно серйозним бізнесом. Тому стартап проекти вважаються ризиковими інвестиціями.

Сама по собі ідея стартап проекту не коштує майже нічого. Головним завданням керівника проекту є перетворення ідеї до готової бізнес моделі. Для цього потрібно сформулювати концепцію товару або послуги, зорієнтуватися з клієнтською групою та ринків збуту.

4.1 Опис ідеї проекту

Кількість верстатів з ЧПК в промисловості за останні десятиліття значно зростає. Це пов'язано зі зміною ринку. Через розвиток автоматичних систем управління, складність геометричних форм, точності розмірів деталей, вимог до шорсткості поверхонь невпинно зростає. Клієнти зосереджуються на високій якості продукції і низькій ціні виготовлення деталей. Виклики часу змушують розвивати верстати з числовим програмним управлінням, зменшувати енерговитрати, підвищувати продуктивність оброблення деталей. Всі ці характеристики, а також мінімальний вплив на навколишнє середовище напряму залежать від якості верстату.

В загальному випадку зменшення похибок від динамічного впливу процесу різання проводять шляхом підбору режимів різання. Зменшення глибини різання, швидкості та подачі не завжди відповідає нашому бажанню підвищення продуктивності оброблення, зменшення часу на оброблення. А підвищення динамічних характеристик за рахунок збільшення жорсткості елементів верстату і технологічної обробляючої системи в цілому веде за собою збільшення ваги верстатів, збільшення ваги рухомих частин, що в свою чергу веде за собою підвищений знос рухомих елементів верстату, підшипників, напрямних. Також підвищується потужність електродвигунів приводу верстатів, збільшується витрата електроенергії, а отже і кінцева ціна продукції.

Технологічна обробляюча система «верстат-інструмент-деталь» здатна до автоколивань під час навантаження. Вібрації виникають у випадку коли система втрачає рівновагу по причині раптового настання перехідного процесу, або його порушення. Примусові коливання визначаються зовнішньою силою, яка динамічно змінюється, або якщо незбалансовані обертові вузли верстату. Третій тип вібрацій пов'язаний із зворотнім зв'язком між ТС і силою, яка не зупиняється, незважаючи на згасання. Виникнення таких періодичних коливань напряму пов'язане з процесом різання, тому щоб

уникнути їх негативний вплив, необхідно використовувати дуже складні системи діагностики стану процесів.

Перераховуючи вищесказане метою даного проекту є розробка системи, яка може моніторити вібрації на верстаті і на їх основі управляти процесом різання в реальному часі.

4.1.1 Аналіз вимірювальних систем

Вимірювальні системи поділяються на декілька типів. Вони можуть бути частиною контролера ЧПУ верстату, або як додатковий модуль програмного забезпечення, або як окремий зовнішній апаратний модуль вимірювання.

В системах виявлення вібрацій найчастіше застосовують різні датчики, такі як: обертові динамометри, різного принципу дії акселерометри, датчики сили (тензодатчики), а також можуть використовуватись акустичні мікрофони, індукційні датчики та лазерні інтерферометри.

Простий і недорогий спосіб вимірювати автоколивань можливий за допомогою використання мікрофона, який підключається до ПК. Але такий метод має недолік, який проявляється в тому, що результати вимірювання мають багато шуму.

Слід зазначити, що виробники верстатів оптимізують їх для різних стандартних вимірювальних систем і датчиків, а сигнали отримані таких систем є доступними для зовнішніх систем вимірювання.

4.1.2 Усунення вібрацій

Найбільш розповсюдженим методом боротьби з вимушеними і автоколиваннями є зниження сил різання, а також підвищення жорсткості і демпфуючих властивостей всіх елементів ТС. Високу вібростійкість верстатів намагаються досягти ще на стадії їх проектування. Можливості

підвищення жорсткості інструменту звичайно обмежені. Жорсткість деталей можна підвищити застосовуючи спеціальні пристрої. Одночасного підвищення жорсткості і демпфуючих властивостей деталі можна добитись за допомогою технологічного армування.

До технологічних методів управління жорсткістю ТС також можна віднести методи послідовного видалення припуску. Наступний підхід підвищення вібростійкості полягає в зниженні регенеративного ефекту, тобто впливу вібраційного сліду на поверхні різання, який залишений попереднім зубом. Цього досягають застосовуючи фрези з перемінними по їх окружності конструкційно-геометричними параметрами зубів, або зі змінною жорсткістю. Недоліком фрез з нерівномірним розташуванням зубів полягає в тому, що вони можуть гасити автоколивання тільки при конкретній швидкості різання.

Ще одним методом зниження регенеративних коливань є визначення таких режимів різання, які забезпечують вібростійкість оброблення в відповідності з пелюстковою діаграмою стійкості. Але, при швидкостях різання, характерних для оброблення сталей сучасними твердосплавними інструментами, ці зони мають невелику протяжність. Тому успішне попадання в них може бути реалізовано тільки на верстатах з безступінчастим регулюванням частоти обертання.

Знизити регенеративний ефект можна також використовуючи перемінну швидкість різання. Перевагою методу є більш широка область технологічних параметрів, в порівнянні з вищеперерахованими методами, в яких можна досягти суттєвого зниження амплітуди коливань. Недоліком такого методу є складність оснащення металорізальних верстатів пристроями для створення перемінної швидкості різання, а також недостатньо вивчені можливості сучасних приводів з ЧПУ управлінням.

Для боротьби з коливаннями в технологічних системах перспективним є використання адаптивних систем управління, які можуть виявляти вібрації в процесі механічного оброблення і в режимі реального часу вносять зміни в режими різання або змінюють характеристики технологічної системи з ціллю зниження коливань.

4.1.3 Аналіз систем спостереження

Аналіз доступних на ринку рішень показав, що в основному це пропозиції самих виробників верстатів з ЧПУ, і окремих незалежних виробників.

У таблиці 4.1 дана інформація, яка дасть загальне уявлення про склад ідеї, цільові потенційні ринки, на яких треба шукати вигоду і потенційних клієнтів.

Таблиця 4.1 – Склад стартапу

Склад ідеї	Вектори застосування	Переваги для клієнта
Розробка системи аналізу вібрацій та сил різання на верстаті. Управління процесом різання.	Металообробні підприємства, як приватні так і державні	Зменшення часу на оброблення
		Зменшення витрат на оброблення
		Підвищення кості поверхні
		Зменшення шансу поломки інструмента

4.2 Аудит проекту

Визначимо технологічність реалізації проекту (таблиця 4.2):

Таблиця 4.2 – Технологічна реалізація проекту

Суть проекту	Доступні технології	Поширеність
Створення системи, яка вимірює вібрації і сили різання які передаються компонентами верстату під час протікання процесу різання.	«haas spindle speed variation»	Доступна на ринку

Після аналізу робимо висновок, що технічно реалізувати дану ідею можливо.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Проведемо аналіз ринкових продуктів від компаній конкурентів для визначення сильних та слабких сторін:

Основний огляд ринкових продуктів проведений в розділі 1.3. Коротко назви продуктів, які знаходяться на ринку:

1. Machining Navi – by Okuma
2. Система VCM (Монітор контролю вібрації) - від Omative
3. Система Promos 2 Prometec
4. Система Toolinspect II MCU
5. Система Qass IM Optimizer 4D Toses
6. Система MZ84 Mozys

Після того як були визначені ринкові можливості, використаємо їх під час ринкового впровадження проекту, аналізу ринкових загроз, які можуть вплинути на реалізацію стартап-проекту. Це дозволить спланувати план

розвитку проекту із урахуванням всіх ризиків ринку, а також потреб майбутніх клієнтів.

Після проведення аналізу попиту було визначено, що на ринку вже присутня дана технологія, але вона має високу вартість і складний спосіб реалізації, тому потребує покращення. Результат аналізу ринку показав що на ринку відсутні серйозні конкуренти. Слід зазначити зростаючу динаміку ринку, так як з року в рік кількість верстатів з ЧПУ зростає, а складність деталей збільшується.

В таблиці 4.3 визначено групи клієнтів які потенційно зацікавлені даним проектом.

Таблиця 4.3 – Потенційні групи клієнтів

Вимоги ринку	Потенційна аудиторія	Вимоги
Аудиторія зацікавлена у високій якості продукції, якості поверхні і точності виготовлення. А також зменшенню часу оброблення і збільшенню продуктивності.	Металообробні підприємства, як приватні так і державні	1)Доступність 2)Легкість використання 3) Довговічність

Після проведеного аналізу потенційних клієнтів, проведемо аналіз середовища ринку: складемо таблицю факторів, які можуть посприяти впровадженню проекту на ринок. А також проведемо аналіз факторів які

можуть перешкодити впровадженню продукту на ринок. Вони представлені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Фактичні загрози

Фактор	Загрози	Можлива реакція компанії
Вартість впровадження	Може вимагати збільшення вартості	Зниження вартості, або відмова від впровадження
Потужність обладнання	Для роботи даного продукту потрібне потужне обладнання	Пошук потужного обладнання, або відмова, отже зменшення кількості клієнтів
Достатня частота вимірювання	Вимагає високочастотне обладнання, а отже великий об'єм пам'яті	Відмова від продукту або збільшення вартості.

Таблиця 4.5 – Фактичні можливості

Фактор	Можливості	Реакція компанії
Підвищення якості поверхні	Забезпечення високої якості поверхні	Застосування системи моніторингу
Збільшення точності поверхні	Збільшення точності виготовлення поверхонь деталей	Застосування системи моніторингу
Зменшення основного часу на оброблення	За рахунок підвищення продуктивності зменшується основний час оброблення	Застосування системи моніторингу

Зменшення ціни виготовлення деталей	За рахунок підвищення продуктивності зменшується основний час оброблення, а отже і вартість	Застосування системи моніторингу
-------------------------------------	---	----------------------------------

На основі аналізу факторів загроз та можливостей маркетингового середовища, складаємо перелік ринкових загроз та можливостей (таблиця 4.6).

Таблиця 4.6 – Аналіз проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Швидке виявлення вібрацій в процесі різання 2. Поточне автоматичне управління 3. Сучасні апаратні засоби для вимірювання коливань та управління процесом різання 4. Жорсткість та потужність верстату залишаються незмінними 	<p>Слабкі сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Потрібно встановлювати на кожному типі верстату окремо 2. Наявність конкурентів
<p>Можливості:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Можливість збільшення продаж за рахунок реклами 2. Фінансування від зацікавлених спонсорів 	<p>Загрози:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Велика конкуренція 2. Складність продукту

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Потрібно сформулювати базову стратегію розвитку для роботи в даних сегментах ринку (таблиця 4. 7).

Таблиця 4.7 – Базова стратегія розвитку

Інший шлях розвитку	Охоплення ринку	Конкурентні позиції	Основна стратегія розвитку
Масовий маркетинг	Збільшення ринку попиту	Краща якість товару, активна маркетингова позиція	Стратегія всеохоплення
Масовий маркетинг	Розвиток особистого бренду продукції	Масштабування за рахунок активної маркетингової позиції	Стратегія всеохоплення ринку

Спираючись на таблицю 4.7 обрана стратегія лідерства (таблиця 4. 8.)

Таблиця 4.8 – Базова поведінка конкурентів

Чи є проект «першопроходцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента?	Стратегія конкурентної поведінки
Ні	Так	Ні	Стратегія

			лідера
Ні	Так	Ні	Стратегія виклику лідера
Ні	Ні	Так	Стратегія наслідуван ня лідеру
Так	Ні	Ні	Стратегія заняття конкурент ної ніші

Таблиця 4.9 – Стратегія позиціонування

Вимоги до товару	Базова стратегія всеохопле ння	Конкурентні позиції	Конкурентна позиція стратегії
Підвищення якості, зменшення часу, зменшення вартості	Стратегія всеохопле ння	Оснащення датчиками за бажанням покупця	Якість комплектуючих, стабільність роботи

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

На основі аналізів було розроблено маркетингову модель. Далі уточнюються ідея, особливості надання послуг (таблиця 4.10).

Таблиця 4.10 – Три рівня моделі товару

Три рівні	Суть і зміст
I. Товар за задумом	Метод контролю вібрацій на верстаті
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики: датчики і програмне забезпечення
	Якість: сертифікати якості на комплектуючі
III. Товар із підкріпленням	Якісний відділ продажів і реклама
Товар буде захищений від копіювання патентом	

Розрахунок цінової політики, якою необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційну продукцію відбувається на основі фінансово-економічного аналізу проекту, який включає в себе також аналіз цін конкурентів.

Таблиця 4.11 – Система збуту

Нюанси поведінки потенційних клієнтів	Які функції має робити постачальник	Канали збуту	Нормальна система збуту
Закупівля одиничними партіями	Вимагає широкої реклами серед металообробних підприємств, як приватних так і державних	Глибоководний канал	Складається із виробника який продає товар і відділу продажів

4.6 Висновки

Під час складання стартап-проекту був проведений аналіз ринку розвитку проекту. Під час аналізу виявлено, що технологічно реалізувати даний проект можливо. Також були визначені сильні та слабкі сторони проекту, визначено напрямки впровадження, і вигоду для покупця.

Машинобудівний ринок є привабливим для входження через актуальність технологій. Слід зазначити, що ринок активно розвивається і з року в рік збільшується на 5-8%. З огляду потенційних груп покупців суттєвих проблем для входу на ринок не виявлено, оскільки аналоги мають високу вартість і потребують покращення технології.

Даний стартап-проект є перспективним для його реалізації і подальшого інвестування в нього.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Петраков Ю. В. Прогнозирование вибрационной устойчивости при точении / Ю. В. Петраков, М. А. Данильченко, А. И. Петришин. – 2019. – С. 1–15.
2. Розробка динамічної моделі технологічної оброблюваної системи точіння з урахуванням багатомасовості. // Нові технології в машинобудуванні. – 2008. – №6. – С. 74–76.
3. Voronov S. A. Stability criteria of flexible details milling / S. A. Voronov, A. V. Nepochatov, I. A. Kiselev. // Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. – 2011. – С. 50–62.
4. Logominov V. A. Modeling of fluctuations of flexible workpieces at end milling / V. A. Logominov, O. L. Lukyanenko. // Visnyk of Sumy State University: Technical Science. – 2011. – №4. – С. 145–157.
5. Зелинский С. А. Математическая модель процесса контурного фрезерования нежестких деталей / С. А. Зелинский, Ю. А. Морозов, Ю. А. Серебрий. // Праці Одеського політехнічного університету. – 2015. – №1. – С. 28–33.
6. Красильников А. Я. Интенсификация режимов концевго фрезерования по критерию асимптотической устойчивости / А. Я. Красильников, К. Ю. Кравченко. // Весник СГТУ. – 2015. – №2. – С. 64–71.
7. Зварзин Д. А. Моделирование процесса плоского фрезерования с учетом зависимости динамических характеристик станка / Д. А. Зварзин, И. А. Кисилёв, Д. Л. Цыганов. // Машины и Установки: проектирование, разработка и эксплуатация. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн.. – 2016. – №4. – С. 53–68.
8. Чикишев Е. В. Математическая модель процесса резания с применением ультразвуковых колебаний и анализ устойчивости процесса / Е. В. Чикишев, Г. Д. Гаспарян. // Modern high technologies. – 2018. – №7. – С. 142–149.

9. Гусейнов Р. В. Математическое моделирование процесса резания коррозионно-стойких сталей / Р. В. Гусейнов. // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering & Technologies. – 2015. – №4. – С. 65–70.
10. Каиров О. С. САПР технологічних процесів / О. С. Каиров. – Миколаїв: НУК, 2007. – 150 с.
11. Капустин Н. М. Разработка технологических процессов обработки деталей на станках с помощью ЭВМ / Н. М. Капустин., 1980. – 256 с.
12. Сикора Е. А. Оптимизация процессов обработки резанием с применением вычислительных машин / Е. А. Сикора., 1983. – 226 с.
13. Корчак С. Н. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов / С. Н. Корчак., 1988. – 352 с.
14. Каиров А. С. Математическое моделирование оптимальных режимов резания при токарной обработке конструкционных сталей / А. С. Каиров, Л. А. Латанская. // Наукові праці. – 2009. – №98. – С. 183–188.
15. Динамические характеристики многоцелевых станков / В. С. Сальников, О. А. Ерзин, Г. В. Шадский, В. В. Жмурин. // Известия ТулГУ Технические науки.
16. Потапов К. Г. Оценка износа резца на основе измерения неравномерности вращения шпинделя токарного станка / К. Г. Потапов, А. Б. Сырицкий. // Вестник МГТУ "Станкин". – 2014. – №4. – С. 107–112.
17. Муслимов А. П. Разработка математической модели процесса резания при токарной обработке / А. П. Муслимов, В. А. Куц. // Известия вузов. – 2011. – №6. – С. 25–28.
18. Ямникова О. А. Стабилизация силы резанья при точении : дис. канд. техн. наук / Ямникова О. А. – Тула, 1997. – 234 с.

- 19.Леонов С. Л. Прогнозирование установившихся автоколебаний при точении металлов / С. Л. Леонов, Е. Б. Белов. // Ползуновский вестник. – 2012. – №1. – С. 181–183.
- 20.Леонов С. Л. Расчет установившихся автоколебаний для прогнозирования волнистости обработанной поверхности при точении металлов / С. Л. Леонов, Е. Б. Белов. // VII Международная научно-практическая конференция "Инновации в машиностроении". – №7. – С. 56–60.
- 21.Хорошайло В. В. Повышение виброустойчивости растачивания на токарно-винторезных станках / В. В. Хорошайло. // Technology audit and production reserves. – 2016. – №1. – С. 17–21.
- 22.Зверев И. А. Моделирование динамической устойчивости процесса растачивания отверстий в деталях из труднообрабатываемых материалов / И. А. Зверев, У. Чжо. // Московский государственный технологический университет "Станкин". – С. 4–10.
- 23.Исследование устойчивости подсистемы инструмента в осевом направлении в зависимости от параметра запаздывания и жесткости процесса точения / В. С.Быкадор, О. В. Тетенко, А. А. Австрийченко, Е. С. Шаламов. // Молодой исследователь Дона. – 2018. – №4. – С. 152–155.
- 24.Маценко В. Г. Математичне моделювання / В. Г. Маценко. – Чернівці: Чернівецький національний університет, 2014. – 519 с.
- 25.Петраков Ю.В. Методичні вказівки до інтерактивних робіт з курсу Управління процесами різання
- 26.Петраков Ю. В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням / Ю. В. Петраков. – Київ: УкрНДІАТ, 2003. – 383 с.
- 27.Метод Рунге — Кутты [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:
<https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%>

- [B4_%D0%A0%D1%83%D0%BD%D0%B3%D0%B5_%E2%80%94%D0%9A%D1%83%D1%82%D1%82%D1%8B.](#)
- 28.Лінійна інтерполяція [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
[https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D1%96%D0%BD%D1%96%D0%B9%D0%BD%D0%B0_%D1%96%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D1%8F%D1%86%D1%96%D1%8F.](#)
- 29.Median Filter [Электронный ресурс] / R. Fisher [et al.]. — Режим доступа: <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/median.htm>.
- 30.Heylen W. Modal Analysis Theory and Testing / W. Heylen, S. Lammens, P. Sas., 1997. – 340 с. – (Leuven: KUL Press).
- 31.Николаев С. М. Идентификация параметров моделей динамики сложнопрофильных деталей при обработке фрезерованием : дис. канд. техн. наук : 01.02.06 / Николаев С. М. – Москва, 2017. – 187 с.
- 32.Перетворення Фур'є [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
[https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D1%80%D0%B5%D1%82%D0%B2%D0%BE%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F_%D0%A4%D1%83%D1%80%27%D1%94.](#)
- 33.Вимірювання вібрації [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
[https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/feeem/4lagutin_vyprobu_v_elektrmashin_t_ransformatoriv/p17.htm.](#)
- 34.(Проводная / Беспроводная сеть) - NGC [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.haascnc.com/ru/service/troubleshooting-and-how-to/how-to/wired--wireless--network---ngc.html>.